

# Appunti ed Esercizi di *Fisica Tecnica e Macchine Termiche*

## Appendici 1-5

*Paolo Di Marco*

Versione 2022.00 – 03.01.2022.

1. Equazioni di stato per i gas ideali e per i liquidi incomprimibili
2. Trasformazioni reversibili per i gas ideali con calori specifici costanti
3. Proprietà termodinamiche dei fluidi.
4. Unità di misura del Sistema Internazionale e fattori di conversione
5. Metodologia per la soluzione di problemi in termodinamica

*La presente dispensa è redatta ad esclusivo uso didattico per gli allievi dei corsi di studi universitari dell'Università di Pisa. L'autore se ne riserva tutti i diritti. Essa può essere riprodotta solo totalmente ed al fine summenzionato, non può essere alterata in alcuna maniera o essere rivenduta ad un costo superiore a quello netto della riproduzione. Ogni altra forma di uso e riproduzione deve essere autorizzata per scritto dall'autore.*

*L'autore sarà grato a chiunque gli segnali errori, inesattezze o possibili miglioramenti.*

**APPENDICE 1 - Equazioni di stato per i gas ideali, fluidi reali, e i liquidi incomprimibili**

**TABELLA RIASSUNTIVA**

<b>Gas ideale</b>	<b>Fluido reale monofase</b>	<b>Liquido incomprimibile</b>
$pV = n_M \mathfrak{R}T$ $pV = MRT$ $pv = RT$	$T = f(p, v)$ $\frac{dv}{v} = \beta dT - \kappa dp$	$v = cost.$
$R = c_p - c_v$ , $k = \frac{c_p}{c_v}$ $c_p = \frac{Rk}{k-1} = f(T)$ $c_v = \frac{R}{k-1} = f(T)$	$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ $\kappa = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$ $c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$	$c_p = c_v = c$
$du = c_v(T) dT$	$du = c_v(v, T) dT + B_u(T, v) dv$	$du = c(T) dT$
$dh = c_p(T) dT$	$dh = c_p(p, T) dT + B_h(T, p) dp$	$dh = c(T) dT + v dp$
$ds = c_v(T) \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$ $ds = c_p(T) \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$	$ds = \frac{c_v}{T} dT + \frac{B_u + p}{T} dv$ $ds = \frac{c_p}{T} dT + \frac{B_h - v}{T} dp$	$ds = c(T) \frac{dT}{T}$
$\beta = \frac{1}{T}$ $\kappa = \frac{1}{p}$ $B_u = B_h = 0$	$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = c_p - \frac{T\beta^2 v}{\kappa}$ $B_u = \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = \frac{\beta T}{\kappa} - p$ $B_h = \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = (1 - \beta T)v$	$\beta = \kappa = 0$ $B_u = 0$ $B_h = v$

Un fluido reale è completamente caratterizzato una volta noti i coefficienti  $c_p$ ,  $\beta$  e  $\kappa$ .  
 Un gas ideale è caratterizzato una volta noti due coefficienti a scelta tra  $c_p$ ,  $c_v$ ,  $k$  o  $R$ .  
 Un liquido incomprimibile è completamente caratterizzato dai valori di  $c$  e  $v$ .

**NOTA**

Le relazioni di Gibbs

$$du = T ds - p dv \quad , \quad dh = T ds + v dp$$

sono valide per qualunque fluido, purchè la trasformazione avvenga tra due stati di equilibrio.

**APPENDICE 2 - Trasformazioni reversibili per i gas ideali con calori specifici costanti: lavoro e calore scambiati**

(N.B.: le variazioni dei termini di energia cinetica e potenziale vengono considerate trascurabili)

**LAVORO DI DILATAZIONE REVERSIBILE (gas ideale)**

$$l_{12} = \int_1^2 p \, dv \quad , \quad r_v = v_2 / v_1, \quad r_p = p_2 / p_1$$

Trasformazione	$v_2$	$T_2$	$p_2$	$l_{12}$	$q_{12}$
ISOTERMA $T = cost$	$\frac{v_1}{r_p}$	$T_1$	$\frac{p_1}{r_v}$	$-RT \ln r_p =$ $= RT \ln r_v$	$q_{12} = l_{12}$
POLITROPICA $pv^n = cost$	$v_1 \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n-1}}$	$T_1 r_v^{1-n}$	$p_1 r_v^{-n}$	$\frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1} =$ $= \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) =$ $= \frac{RT_1}{n-1} (1 - r_v^{1-n})$	$\left( c_v - \frac{R}{n-1} \right) (T_2 - T_1)$
ISOCORA $v = cost$	$v_1$	$T_1 r_p$	$p_1 \frac{T_2}{T_1}$	0	$c_v (T_2 - T_1)$

**LAVORO DI COMPRESSIONE/ESPANSIONE REVERSIBILE IN SISTEMI APERTI A REGIME (gas ideale)**

$$l'_{12} = - \int_1^2 v \, dp \quad , \quad r_v = v_2 / v_1, \quad r_p = p_2 / p_1$$

$$a = \frac{n-1}{n}$$

$$a = \frac{k-1}{k} = \frac{R}{c_p} \quad \text{per trasformazione adiabatica}$$

Trasformazione	$v_2$	$T_2$	$p_2$	$l_{12}$	$q_{12}$
ISOTERMA $T = cost$	$\frac{v_1}{r_p}$	$T_1$	$\frac{p_1}{r_v}$	$-RT \ln r_p =$ $= RT \ln r_v$	$q_{12} = l_{12}$
POLITROPICA $pv^n = cost$	$v_1 r_p^{-\frac{1}{n}}$	$T_1 r_p^a$	$p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{a}}$	$\frac{n}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) =$ $= \frac{Rn}{n-1} (T_1 - T_2) =$ $= - \frac{Rn}{n-1} T_1 (r_p^a - 1)$	$\left( c_p - \frac{Rn}{n-1} \right) (T_2 - T_1)$
ISOCORA $v = cost$	$v_1$	$T_1 r_p$	$p_1 \frac{T_2}{T_1}$	$v_1 (p_2 - p_1) =$ $= R (T_1 - T_2)$	$c_v (T_2 - T_1)$

**APPENDICE 3 – Proprietà termodinamiche dei fluidi.**

Le tabelle che seguono contengono le proprietà di alcuni fluidi, e precisamente: acqua, ammoniaca (R717), R134a e isobutano (R600a).

Le tabelle sono così organizzate: dapprima le proprietà del liquido e del vapore *in condizioni di saturazione* sono riportate in due tabelle, rispettivamente in funzione della temperatura e della pressione. Seguono poi le tabelle del fluido a pressione costante *al di fuori delle condizioni di saturazione*: le proprietà ( $v$ ,  $u$ ,  $h$  ed  $s$ ) sono espresse in funzione della temperatura, per il valore della pressione riportato in testa alla tabella. Ovviamente, il fluido si trova allo stato liquido per temperature inferiori a quella di saturazione ed allo stato di vapore surriscaldato o gas per temperature superiori a quest'ultima: la transizione risulta evidente da una brusca discontinuità nel valore delle proprietà stesse.

E' importante ricordare che *tutte le proprietà di stato sono definite a meno di una costante arbitraria*: non bisogna pertanto stupirsi se alcuni diagrammi o programmi di calcolo (es. CATT) forniscono valori diversi per alcuni dei fluidi considerati: le variazioni delle proprietà tra due stati rimangono però quasi identiche in tutti i casi. Inoltre i valori delle proprietà possono anche variare leggermente da un manuale ad un altro a seconda dei diversi modelli adottati.

Acqua

Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della temperatura

Temp.	Press.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna (V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
T [C]	$p$ [MPa]	$v_l$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
0	0.001	1.000E-03	206.676	-0.04	2375.32	-0.04	2501.34	0.000	9.157
5	0.001	1.000E-03	147.401	20.97	2382.25	20.98	2510.55	0.076	9.027
10	0.001	1.000E-03	106.586	41.99	2389.16	41.99	2519.75	0.151	8.902
15	0.002	1.001E-03	78.084	62.98	2396.05	62.98	2528.92	0.224	8.782
20	0.002	1.002E-03	57.912	83.94	2402.92	83.94	2538.07	0.297	8.668
25	0.003	1.003E-03	43.454	104.86	2409.77	104.87	2547.18	0.367	8.559
30	0.004	1.004E-03	32.966	125.77	2416.59	125.77	2556.25	0.437	8.454
35	0.006	1.006E-03	25.273	146.66	2423.37	146.66	2565.29	0.505	8.354
40	0.007	1.008E-03	19.567	167.54	2430.12	167.54	2574.27	0.572	8.258
45	0.010	1.010E-03	15.292	188.42	2436.82	188.43	2583.20	0.639	8.166
50	0.012	1.012E-03	12.058	209.30	2443.48	209.31	2592.07	0.704	8.077
55	0.016	1.015E-03	9.588	230.19	2450.09	230.20	2600.87	0.768	7.992
60	0.020	1.017E-03	7.686	251.09	2456.64	251.11	2609.60	0.831	7.910
65	0.025	1.020E-03	6.208	272.00	2463.13	272.03	2618.26	0.893	7.832
70	0.031	1.023E-03	5.051	292.93	2469.56	292.96	2626.82	0.955	7.756
75	0.039	1.026E-03	4.138	313.88	2475.92	313.91	2635.30	1.015	7.683
80	0.047	1.029E-03	3.413	334.84	2482.21	334.89	2643.67	1.075	7.613
85	0.058	1.032E-03	2.832	355.82	2488.41	355.88	2651.95	1.134	7.545
90	0.070	1.036E-03	2.364	376.83	2494.54	376.90	2660.11	1.192	7.480
95	0.084	1.040E-03	1.984	397.86	2500.57	397.95	2668.15	1.250	7.416
100	0.101	1.044E-03	1.675	418.92	2506.52	419.02	2676.07	1.307	7.355
105	0.121	1.047E-03	1.421	440.01	2512.36	440.13	2683.85	1.363	7.296
110	0.143	1.052E-03	1.211	461.13	2518.11	461.28	2691.50	1.418	7.239
115	0.169	1.056E-03	1.038	482.29	2523.74	482.46	2698.99	1.473	7.184
120	0.198	1.060E-03	0.893	503.48	2529.26	503.69	2706.33	1.528	7.130
125	0.232	1.065E-03	0.771	524.72	2534.66	524.97	2713.50	1.581	7.078
130	0.270	1.070E-03	0.669	546.01	2539.93	546.30	2720.49	1.634	7.027
135	0.313	1.075E-03	0.583	567.34	2545.06	567.68	2727.29	1.687	6.978
140	0.361	1.080E-03	0.509	588.73	2550.05	589.12	2733.90	1.739	6.930
145	0.415	1.085E-03	0.447	610.17	2554.89	610.62	2740.30	1.791	6.884
150	0.475	1.090E-03	0.393	631.67	2559.57	632.19	2746.49	1.842	6.838
155	0.543	1.096E-03	0.347	653.23	2564.08	653.83	2752.44	1.892	6.794
160	0.617	1.102E-03	0.307	674.86	2568.42	675.54	2758.14	1.943	6.751
165	0.700	1.108E-03	0.273	696.55	2572.56	697.33	2763.59	1.992	6.708
170	0.791	1.114E-03	0.243	718.32	2576.51	719.20	2768.76	2.042	6.667
175	0.891	1.121E-03	0.217	740.16	2580.25	741.16	2773.65	2.091	6.626
180	1.001	1.127E-03	0.194	762.08	2583.76	763.21	2778.24	2.140	6.586
185	1.122	1.134E-03	0.174	784.09	2587.05	785.36	2782.51	2.188	6.547
190	1.253	1.141E-03	0.157	806.18	2590.08	807.61	2786.46	2.236	6.508
195	1.397	1.149E-03	0.141	828.36	2592.86	829.97	2790.05	2.283	6.470
200	1.552	1.156E-03	0.127	850.64	2595.38	852.44	2793.29	2.331	6.433
205	1.721	1.164E-03	0.115	873.03	2597.60	875.03	2796.14	2.378	6.396
210	1.905	1.173E-03	0.105	895.52	2599.54	897.75	2798.60	2.425	6.359
215	2.102	1.181E-03	0.095	918.13	2601.16	920.61	2800.64	2.471	6.323
220	2.316	1.190E-03	0.086	940.86	2602.45	943.62	2802.25	2.518	6.287
225	2.546	1.199E-03	0.079	963.72	2603.41	966.78	2803.41	2.564	6.251
230	2.793	1.209E-03	0.072	986.73	2604.01	990.10	2804.10	2.610	6.215
235	3.058	1.219E-03	0.065	1009.89	2604.23	1013.61	2804.29	2.656	6.180
240	3.342	1.229E-03	0.060	1033.20	2604.07	1037.31	2803.97	2.701	6.144
245	3.646	1.240E-03	0.055	1056.70	2603.51	1061.22	2803.12	2.747	6.109
250	3.970	1.251E-03	0.050	1080.38	2602.51	1085.35	2801.70	2.793	6.073
260	4.686	1.276E-03	0.042	1128.38	2599.16	1134.36	2797.08	2.884	6.002
270	5.496	1.302E-03	0.036	1177.35	2593.82	1184.50	2789.86	2.975	5.931
280	6.408	1.332E-03	0.030	1227.45	2586.27	1235.98	2779.75	3.067	5.858
290	7.433	1.366E-03	0.026	1278.90	2576.18	1289.05	2766.37	3.159	5.783
300	8.577	1.404E-03	0.022	1331.99	2563.15	1344.03	2749.19	3.253	5.705
310	9.853	1.447E-03	0.018	1387.05	2546.60	1401.31	2727.52	3.349	5.623
320	11.270	1.499E-03	0.015	1444.57	2525.70	1461.47	2700.36	3.448	5.537
330	12.842	1.561E-03	0.013	1505.27	2499.16	1525.31	2666.17	3.551	5.442
340	14.581	1.638E-03	0.011	1570.31	2464.90	1594.19	2622.47	3.659	5.336
350	16.506	1.740E-03	0.009	1641.90	2419.07	1670.62	2564.77	3.778	5.213
360	18.640	1.893E-03	0.007	1725.43	2352.98	1760.72	2482.85	3.915	5.056
370	21.017	2.217E-03	0.005	1844.87	2232.27	1891.47	2336.60	4.112	4.804

**Acqua**  
**Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della pressione**

Press.	Temp.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna (V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
$p$ [MPa]	$T$ [C]	$v_l$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
0.00061	0.01	1.000E-03	206.58	-0.02	2375.33	-0.01	2501.35	0.000	9.157
0.0007	1.92	1.000E-03	181.27	8.00	2377.98	8.01	2504.87	0.029	9.107
0.0008	3.80	1.000E-03	159.69	15.91	2380.58	15.91	2508.33	0.058	9.058
0.0010	7.01	1.000E-03	129.22	29.41	2385.02	29.41	2514.24	0.106	8.976
0.0015	13.06	1.001E-03	87.99	54.83	2393.37	54.83	2525.36	0.196	8.828
0.0020	17.53	1.001E-03	67.01	73.60	2399.54	73.61	2533.56	0.261	8.724
0.0025	21.12	1.002E-03	54.26	88.61	2404.45	88.62	2540.10	0.312	8.643
0.0030	24.12	1.003E-03	45.67	101.18	2408.57	101.18	2545.58	0.355	8.578
0.0035	26.71	1.003E-03	39.48	112.03	2412.11	112.03	2550.29	0.391	8.523
0.0040	29.00	1.004E-03	34.80	121.60	2415.23	121.60	2554.45	0.423	8.475
0.0050	32.92	1.005E-03	28.20	137.96	2420.55	137.96	2561.53	0.477	8.395
0.0075	40.34	1.008E-03	19.24	168.94	2430.57	168.94	2574.87	0.577	8.252
0.010	45.85	1.010E-03	14.68	191.98	2437.96	191.99	2584.72	0.650	8.150
0.015	54.02	1.014E-03	10.02	226.08	2448.80	226.10	2599.15	0.755	8.009
0.020	60.11	1.017E-03	7.650	251.54	2456.78	251.56	2609.79	0.832	7.909
0.030	69.15	1.022E-03	5.230	289.35	2468.47	289.38	2625.36	0.944	7.769
0.040	75.91	1.026E-03	3.994	317.68	2477.07	317.72	2636.83	1.026	7.670
0.050	81.37	1.030E-03	3.241	340.58	2483.91	340.63	2645.95	1.091	7.594
0.060	85.98	1.033E-03	2.732	359.93	2489.62	359.99	2653.55	1.146	7.532
0.070	89.98	1.036E-03	2.365	376.76	2494.52	376.83	2660.08	1.192	7.480
0.080	93.54	1.039E-03	2.087	391.71	2498.82	391.79	2665.81	1.233	7.435
0.090	96.74	1.041E-03	1.870	405.18	2502.65	405.28	2670.92	1.270	7.395
0.100	99.66	1.043E-03	1.694	417.48	2506.12	417.58	2675.53	1.303	7.360
0.150	111.40	1.053E-03	1.159	467.06	2519.70	467.22	2693.61	1.434	7.223
0.200	120.26	1.061E-03	0.886	504.61	2529.55	504.82	2706.71	1.530	7.127
0.300	133.58	1.073E-03	0.606	561.27	2543.62	561.59	2725.38	1.672	6.992
0.400	143.67	1.084E-03	0.463	604.45	2553.62	604.88	2738.62	1.777	6.896
0.500	151.89	1.093E-03	0.375	639.82	2561.30	640.37	2748.77	1.861	6.821
0.600	158.89	1.101E-03	0.316	670.05	2567.47	670.71	2756.90	1.932	6.760
0.700	165.01	1.108E-03	0.273	696.60	2572.57	697.38	2763.60	1.993	6.708
0.800	170.47	1.115E-03	0.240	720.39	2576.87	721.28	2769.24	2.047	6.663
0.900	175.42	1.121E-03	0.215	742.00	2580.55	743.01	2774.05	2.095	6.623
1.000	179.95	1.127E-03	0.194	761.86	2583.73	762.99	2778.20	2.139	6.587
1.200	188.03	1.139E-03	0.163	797.47	2588.92	798.84	2784.95	2.217	6.524
1.400	195.12	1.149E-03	0.141	828.88	2592.93	830.49	2790.13	2.285	6.469
1.600	201.45	1.159E-03	0.124	857.13	2596.05	858.98	2794.16	2.345	6.422
1.800	207.19	1.168E-03	0.110	882.88	2598.49	884.99	2797.27	2.399	6.380
2.000	212.46	1.177E-03	0.100	906.63	2600.37	908.99	2799.66	2.448	6.341
2.500	224.04	1.197E-03	0.080	959.31	2603.25	962.30	2803.22	2.555	6.258
3.000	233.94	1.217E-03	0.067	1004.97	2604.22	1008.62	2804.29	2.646	6.187
3.500	242.65	1.235E-03	0.057	1045.61	2603.83	1049.93	2803.59	2.726	6.126
4.000	250.44	1.252E-03	0.050	1082.49	2602.40	1087.50	2801.55	2.797	6.070
4.500	257.52	1.269E-03	0.044	1116.42	2600.17	1122.13	2798.46	2.861	6.020
5.000	264.03	1.286E-03	0.039	1147.98	2597.26	1154.41	2794.50	2.920	5.974
5.500	270.05	1.302E-03	0.036	1177.60	2593.79	1184.77	2789.82	2.975	5.930
6.000	275.67	1.319E-03	0.032	1205.61	2589.83	1213.52	2784.51	3.027	5.889
7.000	285.91	1.351E-03	0.027	1257.70	2580.63	1267.16	2772.26	3.121	5.814
8.000	295.09	1.384E-03	0.024	1305.72	2569.94	1316.79	2758.13	3.207	5.743
9.000	303.43	1.418E-03	0.020	1350.64	2557.91	1363.40	2742.30	3.286	5.677
10.000	311.09	1.453E-03	0.018	1393.17	2544.56	1407.69	2724.86	3.360	5.614
11.000	318.17	1.489E-03	0.016	1433.84	2529.90	1450.21	2705.80	3.430	5.553
12.000	324.77	1.527E-03	0.014	1473.08	2513.85	1491.40	2685.04	3.496	5.493
13.000	330.95	1.567E-03	0.013	1511.26	2496.27	1531.63	2662.46	3.561	5.433
14.000	336.77	1.611E-03	0.011	1548.72	2476.99	1571.28	2637.84	3.623	5.372
15.000	342.26	1.658E-03	0.010	1585.82	2455.73	1610.70	2610.87	3.685	5.310
16.000	347.47	1.711E-03	0.009	1622.94	2432.11	1650.32	2581.11	3.746	5.246
17.000	352.41	1.771E-03	0.008	1660.58	2405.54	1690.68	2547.88	3.808	5.179
18.000	357.11	1.841E-03	0.008	1699.43	2375.13	1732.56	2510.15	3.872	5.106
19.000	361.59	1.926E-03	0.007	1740.66	2339.31	1777.26	2466.08	3.940	5.025
20.000	365.86	2.039E-03	0.006	1786.59	2294.93	1827.37	2412.02	4.016	4.930
21.000	369.93	2.213E-03	0.005	1843.67	2233.62	1890.14	2338.21	4.110	4.807
22.000	373.80	2.766E-03	0.004	1966.01	2094.87	2026.85	2174.63	4.318	4.547

**Acqua: Liquido compresso e vapore surriscaldato.**

H2O	$p = 0.01$	[MPa]	Tsat =	45.9 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	-0.03	0.000
25	1.003E-03	104.86	104.87	0.367
50	1.487E+01	2443.88	2592.57	8.175
75	1.603E+01	2479.62	2639.96	8.316
100	1.720E+01	2515.51	2687.46	8.448
120	1.812E+01	2544.35	2725.58	8.547
150	1.951E+01	2587.87	2782.99	8.688
170	2.044E+01	2617.09	2821.47	8.777
200	2.183E+01	2661.28	2879.53	8.904
250	2.414E+01	2735.96	2977.32	9.100
300	2.645E+01	2812.07	3076.52	9.281
350	2.875E+01	2889.69	3177.23	9.450
400	3.106E+01	2968.90	3279.52	9.608
450	3.337E+01	3049.75	3383.45	9.757
500	3.568E+01	3132.27	3489.06	9.898
550	3.799E+01	3216.50	3596.37	10.032
600	4.029E+01	3302.46	3705.41	10.161
650	4.260E+01	3390.17	3816.20	10.284
700	4.491E+01	3479.64	3928.75	10.403
800	4.953E+01	3663.86	4159.12	10.628

H2O	$p = 0.05$	[MPa]	Tsat =	81.4 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	0.01	0.000
25	1.003E-03	104.86	104.91	0.367
50	1.012E-03	209.29	209.34	0.704
75	1.026E-03	313.87	313.92	1.015
100	3.418E+00	2511.61	2682.53	7.695
120	3.608E+00	2541.24	2721.62	7.797
150	3.889E+00	2585.62	2780.08	7.940
170	4.076E+00	2615.24	2819.06	8.030
200	4.356E+00	2659.85	2877.65	8.158
250	4.820E+00	2734.98	2976.00	8.356
300	5.284E+00	2811.33	3075.53	8.537
350	5.747E+00	2889.12	3176.46	8.706
400	6.209E+00	2968.44	3278.90	8.864
450	6.672E+00	3049.37	3382.94	9.013
500	7.134E+00	3131.95	3488.63	9.155
550	7.596E+00	3216.23	3596.01	9.289
600	8.057E+00	3302.23	3705.11	9.418
650	8.519E+00	3389.98	3815.94	9.541
700	8.981E+00	3479.47	3928.52	9.660
800	9.904E+00	3663.72	4158.95	9.885

H2O	$p = 0.1$	[MPa]	Tsat =	99.7 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	0.06	0.000
25	1.003E-03	104.86	104.96	0.367
50	1.012E-03	209.29	209.39	0.704
75	1.026E-03	313.86	313.96	1.015
100	1.696E+00	2506.64	2676.22	7.361
120	1.793E+00	2537.29	2716.58	7.467
150	1.936E+00	2582.75	2776.39	7.613
170	2.031E+00	2612.89	2816.00	7.705
200	2.172E+00	2658.05	2875.28	7.834
250	2.406E+00	2733.74	2974.34	8.033
300	2.639E+00	2810.41	3074.29	8.216
350	2.871E+00	2888.40	3175.49	8.385
400	3.103E+00	2967.86	3278.12	8.543
450	3.334E+00	3048.89	3382.30	8.693
500	3.565E+00	3131.55	3488.10	8.834
550	3.797E+00	3215.90	3595.57	8.969
600	4.028E+00	3301.95	3704.73	9.098
650	4.259E+00	3389.73	3815.62	9.221
700	4.490E+00	3479.26	3928.24	9.340
800	4.952E+00	3663.55	4158.73	9.565

H2O	$p = 0.2$	[MPa]	Tsat =	120.3 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	0.16	0.000
25	1.003E-03	104.85	105.05	0.367
50	1.012E-03	209.27	209.47	0.704
75	1.026E-03	313.84	314.05	1.015
100	1.043E-03	418.89	419.10	1.307
120	1.060E-03	503.48	503.69	1.528
150	9.596E-01	2576.88	2768.81	7.279
170	1.008E+00	2608.09	2809.75	7.374
200	1.080E+00	2654.40	2870.47	7.507
250	1.199E+00	2731.23	2970.99	7.709
300	1.316E+00	2808.56	3071.80	7.893
350	1.433E+00	2886.96	3173.54	8.063
400	1.549E+00	2966.70	3276.56	8.222
450	1.665E+00	3047.94	3381.02	8.371
500	1.781E+00	3130.76	3487.04	8.513
550	1.897E+00	3215.23	3594.67	8.648
600	2.013E+00	3301.38	3703.97	8.777
650	2.129E+00	3389.24	3814.97	8.901
700	2.244E+00	3478.83	3927.68	9.019
800	2.475E+00	3663.21	4158.29	9.245

H2O	$p = 0.3$	[MPa]	Tsat =	133.6 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	0.26	0.000
25	1.003E-03	104.84	105.14	0.367
50	1.012E-03	209.25	209.56	0.704
75	1.026E-03	313.82	314.13	1.015
100	1.043E-03	418.86	419.17	1.307
120	1.060E-03	503.45	503.76	1.527
150	6.339E-01	2570.80	2760.96	7.078
170	6.673E-01	2603.14	2803.32	7.176
200	7.163E-01	2650.66	2865.55	7.312
250	7.964E-01	2728.69	2967.60	7.517
300	8.753E-01	2806.70	3069.28	7.702
350	9.536E-01	2885.51	3171.59	7.873
400	1.032E+00	2965.54	3274.99	8.033
450	1.109E+00	3046.98	3379.74	8.183
500	1.187E+00	3129.96	3485.97	8.325
550	1.264E+00	3214.55	3593.78	8.460
600	1.341E+00	3300.80	3703.21	8.589
650	1.419E+00	3388.74	3814.32	8.713
700	1.496E+00	3478.40	3927.12	8.832
800	1.650E+00	3662.87	4157.86	9.058

H2O	$p = 0.4$	[MPa]	Tsat =	143.7 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	0.36	0.000
25	1.003E-03	104.83	105.24	0.367
50	1.012E-03	209.24	209.64	0.704
75	1.026E-03	313.80	314.21	1.015
100	1.043E-03	418.83	419.25	1.307
120	1.060E-03	503.41	503.83	1.527
150	4.708E-01	2564.49	2752.82	6.930
170	4.966E-01	2598.05	2796.70	7.031
200	5.342E-01	2646.83	2860.52	7.171
250	5.951E-01	2726.12	2964.17	7.379
300	6.548E-01	2804.82	3066.75	7.566
350	7.139E-01	2884.06	3169.63	7.738
400	7.726E-01	2964.37	3273.42	7.898
450	8.311E-01	3046.02	3378.45	8.049
500	8.893E-01	3129.17	3484.90	8.191
550	9.475E-01	3213.88	3592.88	8.327
600	1.006E+00	3300.23	3702.45	8.456
650	1.064E+00	3388.25	3813.66	8.580
700	1.121E+00	3477.96	3926.55	8.699
800	1.237E+00	3662.53	4157.42	8.924

H2O	p = 0.5	[MPa]	Tsat =	151.9 °C
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	1.000E-03	-0.04	0.46	0.000
25	1.003E-03	104.83	105.33	0.367
50	1.012E-03	209.22	209.73	0.703
75	1.026E-03	313.77	314.29	1.015
100	1.043E-03	418.80	419.32	1.306
120	1.060E-03	503.38	503.91	1.527
150	1.090E-03	631.66	632.20	1.842
170	3.942E-01	2592.79	2789.87	6.916
200	4.249E-01	2642.92	2855.38	7.059
250	4.744E-01	2723.51	2960.69	7.271
300	5.226E-01	2802.92	3064.20	7.460
350	5.701E-01	2882.60	3167.65	7.633
400	6.173E-01	2963.20	3271.84	7.794
450	6.642E-01	3045.06	3377.16	7.945
500	7.109E-01	3128.37	3483.83	8.087
550	7.575E-01	3213.21	3591.98	8.223
600	8.041E-01	3299.66	3701.69	8.352
650	8.505E-01	3387.75	3813.01	8.476
700	8.969E-01	3477.53	3925.99	8.595
800	9.896E-01	3662.19	4156.98	8.821

H2O	p = 0.8	[MPa]	Tsat =	170.5 °C
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.998E-04	-0.03	0.77	0.000
25	1.003E-03	104.80	105.61	0.367
50	1.012E-03	209.18	209.99	0.703
75	1.026E-03	313.71	314.53	1.015
100	1.043E-03	418.71	419.55	1.306
120	1.060E-03	503.27	504.12	1.527
150	1.090E-03	631.51	632.39	1.841
170	1.114E-03	718.31	719.21	2.042
200	2.608E-01	2630.62	2839.26	6.816
250	2.931E-01	2715.47	2949.98	7.038
300	3.241E-01	2797.15	3056.44	7.233
350	3.544E-01	2878.17	3161.69	7.409
400	3.843E-01	2959.67	3267.08	7.572
450	4.139E-01	3042.17	3373.28	7.724
500	4.433E-01	3125.96	3480.61	7.867
550	4.726E-01	3211.18	3589.28	8.003
600	5.018E-01	3297.93	3699.40	8.133
650	5.310E-01	3386.27	3811.05	8.258
700	5.601E-01	3476.24	3924.29	8.377
800	6.181E-01	3661.17	4155.67	8.603

H2O	p = 1.2	[MPa]	Tsat =	188.0 °C
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.996E-04	-0.02	1.17	0.000
25	1.002E-03	104.77	105.98	0.367
50	1.012E-03	209.12	210.33	0.703
75	1.025E-03	313.62	314.85	1.015
100	1.043E-03	418.60	419.85	1.306
120	1.060E-03	503.13	504.40	1.527
150	1.090E-03	631.33	632.63	1.841
170	1.114E-03	718.09	719.42	2.041
200	1.693E-01	2612.75	2815.91	6.590
250	1.923E-01	2704.21	2935.02	6.829
300	2.138E-01	2789.23	3045.81	7.032
350	2.345E-01	2872.17	3153.60	7.212
400	2.548E-01	2954.91	3260.67	7.377
450	2.748E-01	3038.29	3368.06	7.531
500	2.946E-01	3122.73	3476.29	7.676
550	3.143E-01	3208.46	3585.66	7.813
600	3.339E-01	3295.61	3696.33	7.943
650	3.535E-01	3384.27	3808.43	8.068
700	3.729E-01	3474.50	3922.02	8.188
800	4.118E-01	3659.80	4153.92	8.415

H2O	p = 0.6	[MPa]	Tsat =	158.9 °C
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.999E-04	-0.03	0.57	0.000
25	1.003E-03	104.82	105.42	0.367
50	1.012E-03	209.21	209.82	0.703
75	1.026E-03	313.75	314.37	1.015
100	1.043E-03	418.77	419.40	1.306
120	1.060E-03	503.34	503.98	1.527
150	1.090E-03	631.61	632.26	1.842
170	3.258E-01	2587.37	2782.83	6.819
200	3.520E-01	2638.92	2850.13	6.966
250	3.938E-01	2720.87	2957.17	7.182
300	4.344E-01	2801.01	3061.64	7.372
350	4.742E-01	2881.13	3165.67	7.546
400	5.137E-01	2962.03	3270.26	7.708
450	5.529E-01	3044.10	3375.87	7.859
500	5.920E-01	3127.57	3482.76	8.002
550	6.309E-01	3212.53	3591.08	8.138
600	6.697E-01	3299.08	3700.93	8.267
650	7.085E-01	3387.26	3812.36	8.391
700	7.472E-01	3477.10	3925.42	8.511
800	8.245E-01	3661.85	4156.55	8.737

H2O	p = 1.0	[MPa]	Tsat =	180.0 °C
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.997E-04	-0.03	0.97	0.000
25	1.002E-03	104.79	105.79	0.367
50	1.012E-03	209.15	210.16	0.703
75	1.025E-03	313.67	314.69	1.015
100	1.043E-03	418.66	419.70	1.306
120	1.060E-03	503.20	504.26	1.527
150	1.090E-03	631.42	632.51	1.841
170	1.114E-03	718.20	719.31	2.042
200	2.060E-01	2621.91	2827.86	6.694
250	2.327E-01	2709.92	2942.60	6.925
300	2.579E-01	2793.22	3051.16	7.123
350	2.825E-01	2875.19	3157.66	7.301
400	3.066E-01	2957.30	3263.89	7.465
450	3.304E-01	3040.24	3370.67	7.618
500	3.541E-01	3124.35	3478.46	7.762
550	3.776E-01	3209.82	3587.47	7.899
600	4.011E-01	3296.77	3697.87	8.029
650	4.245E-01	3385.27	3809.74	8.154
700	4.478E-01	3475.37	3923.16	8.273
800	4.943E-01	3660.48	4154.80	8.500

H2O	p = 1.4	[MPa]	Tsat =	195.1 °C
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.995E-04	-0.02	1.38	0.000
25	1.002E-03	104.76	106.16	0.367
50	1.012E-03	209.09	210.51	0.703
75	1.025E-03	313.58	315.01	1.015
100	1.043E-03	418.54	420.00	1.306
120	1.060E-03	503.06	504.54	1.526
150	1.090E-03	631.23	632.76	1.841
170	1.114E-03	717.97	719.53	2.041
200	1.430E-01	2603.09	2803.33	6.498
250	1.635E-01	2698.32	2927.23	6.747
300	1.823E-01	2785.17	3040.36	6.953
350	2.003E-01	2869.13	3149.50	7.136
400	2.178E-01	2952.51	3257.44	7.303
450	2.351E-01	3036.34	3365.43	7.457
500	2.521E-01	3121.11	3474.12	7.603
550	2.691E-01	3207.10	3583.84	7.740
600	2.860E-01	3294.45	3694.79	7.871
650	3.027E-01	3383.27	3807.11	7.996
700	3.195E-01	3473.63	3920.89	8.116
800	3.528E-01	3659.11	4153.05	8.343

H2O	$p = 1.6$	[MPa]	Tsat =	201.5 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.994E-04	-0.02	1.58	0.000
25	1.002E-03	104.74	106.35	0.367
50	1.011E-03	209.06	210.68	0.703
75	1.025E-03	313.53	315.17	1.014
100	1.043E-03	418.48	420.15	1.306
120	1.060E-03	502.98	504.68	1.526
150	1.090E-03	631.14	632.88	1.840
170	1.114E-03	717.86	719.64	2.041
200	1.156E-03	850.61	852.46	2.331
250	1.418E-01	2692.27	2919.21	6.673
300	1.586E-01	2781.04	3034.83	6.884
350	1.746E-01	2866.06	3145.36	7.069
400	1.901E-01	2950.10	3254.18	7.237
450	2.053E-01	3034.38	3362.80	7.393
500	2.203E-01	3119.48	3471.94	7.539
550	2.352E-01	3205.73	3582.02	7.677
600	2.500E-01	3293.29	3693.25	7.808
650	2.647E-01	3382.27	3805.79	7.933
700	2.794E-01	3472.76	3919.75	8.054
800	3.086E-01	3658.42	4152.17	8.281

H2O	$p = 1.8$	[MPa]	Tsat =	207.2 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.993E-04	-0.02	1.78	0.000
25	1.002E-03	104.73	106.53	0.367
50	1.011E-03	209.03	210.85	0.703
75	1.025E-03	313.49	315.34	1.014
100	1.043E-03	418.42	420.30	1.305
120	1.059E-03	502.91	504.82	1.526
150	1.090E-03	631.04	633.00	1.840
170	1.113E-03	717.75	719.75	2.041
200	1.156E-03	850.46	852.54	2.330
250	1.250E-01	2686.03	2910.97	6.607
300	1.402E-01	2776.84	3029.22	6.823
350	1.546E-01	2862.96	3141.19	7.010
400	1.685E-01	2947.67	3250.91	7.179
450	1.821E-01	3032.41	3360.15	7.336
500	1.955E-01	3117.85	3469.76	7.482
550	2.088E-01	3204.36	3580.19	7.621
600	2.220E-01	3292.12	3691.70	7.752
650	2.351E-01	3381.27	3804.47	7.878
700	2.482E-01	3471.89	3918.61	7.998
800	2.742E-01	3657.74	4151.29	8.226

H2O	$p = 2.0$	[MPa]	Tsat =	212.5 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.992E-04	-0.01	1.99	0.000
25	1.002E-03	104.71	106.72	0.367
50	1.011E-03	209.00	211.02	0.703
75	1.025E-03	313.45	315.50	1.014
100	1.043E-03	418.37	420.45	1.305
120	1.059E-03	502.84	504.96	1.526
150	1.089E-03	630.95	633.13	1.840
170	1.113E-03	717.63	719.86	2.040
200	1.156E-03	850.31	852.62	2.330
250	1.114E-01	2679.59	2902.47	6.545
300	1.255E-01	2772.57	3023.51	6.766
350	1.386E-01	2859.82	3136.97	6.956
400	1.512E-01	2945.22	3247.61	7.127
450	1.635E-01	3030.43	3357.49	7.284
500	1.757E-01	3116.21	3467.56	7.432
550	1.877E-01	3202.98	3578.35	7.571
600	1.996E-01	3290.95	3690.15	7.702
650	2.114E-01	3380.26	3803.15	7.828
700	2.232E-01	3471.01	3917.47	7.949
800	2.467E-01	3657.05	4150.42	8.177

H2O	$p = 2.5$	[MPa]	Tsat =	224.0 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.990E-04	-0.01	2.49	0.000
25	1.002E-03	104.67	107.18	0.367
50	1.011E-03	208.92	211.45	0.703
75	1.025E-03	313.34	315.90	1.014
100	1.042E-03	418.22	420.83	1.305
120	1.059E-03	502.67	505.31	1.525
150	1.089E-03	630.72	633.44	1.839
170	1.113E-03	717.35	720.14	2.040
200	1.156E-03	849.94	852.82	2.329
250	8.700E-02	2662.56	2880.07	6.408
300	9.890E-02	2761.57	3008.82	6.644
350	1.098E-01	2851.85	3126.25	6.840
400	1.201E-01	2939.04	3239.29	7.015
450	1.301E-01	3025.44	3350.79	7.175
500	1.400E-01	3112.09	3462.05	7.323
550	1.497E-01	3199.52	3573.75	7.463
600	1.593E-01	3288.01	3686.26	7.596
650	1.688E-01	3377.74	3799.83	7.722
700	1.783E-01	3468.82	3914.61	7.844
800	1.972E-01	3655.33	4148.22	8.072

H2O	$p = 3.0$	[MPa]	Tsat =	234.0 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.987E-04	0.00	3.00	0.000
25	1.002E-03	104.64	107.64	0.367
50	1.011E-03	208.85	211.88	0.702
75	1.025E-03	313.23	316.30	1.014
100	1.042E-03	418.08	421.20	1.305
120	1.059E-03	502.49	505.67	1.525
150	1.089E-03	630.48	633.75	1.839
170	1.113E-03	717.07	720.41	2.039
200	1.155E-03	849.56	853.03	2.329
250	7.058E-02	2644.01	2855.76	6.287
300	8.114E-02	2750.05	2993.49	6.539
350	9.053E-02	2843.67	3115.26	6.743
400	9.936E-02	2932.76	3230.84	6.921
450	1.079E-01	3020.40	3344.01	7.083
500	1.162E-01	3107.93	3456.49	7.234
550	1.244E-01	3196.03	3569.11	7.375
600	1.324E-01	3285.05	3682.35	7.508
650	1.404E-01	3375.20	3796.49	7.636
700	1.484E-01	3466.61	3911.74	7.757
800	1.641E-01	3653.60	4146.02	7.986

H2O	$p = 3.5$	[MPa]	Tsat =	242.7 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.985E-04	0.01	3.50	0.000
25	1.001E-03	104.60	108.10	0.366
50	1.011E-03	208.77	212.31	0.702
75	1.024E-03	313.12	316.71	1.013
100	1.042E-03	417.94	421.58	1.304
120	1.058E-03	502.31	506.02	1.525
150	1.088E-03	630.25	634.06	1.838
170	1.112E-03	716.79	720.68	2.038
200	1.154E-03	849.19	853.23	2.328
250	5.873E-02	2623.66	2829.20	6.175
300	6.842E-02	2738.00	2977.47	6.446
350	7.678E-02	2835.28	3104.00	6.658
400	8.453E-02	2926.38	3222.25	6.840
450	9.196E-02	3015.30	3337.16	7.005
500	9.918E-02	3103.74	3450.88	7.157
550	1.063E-01	3192.52	3564.44	7.299
600	1.132E-01	3282.07	3678.42	7.434
650	1.201E-01	3372.64	3793.14	7.562
700	1.270E-01	3464.40	3908.85	7.684
800	1.406E-01	3651.87	4143.82	7.914

H2O	$p = 4.0$	[MPa]	Tsat =	250.4 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.982E-04	0.02	4.01	0.000
25	1.001E-03	104.56	108.56	0.366
50	1.010E-03	208.70	212.74	0.702
75	1.024E-03	313.01	317.11	1.013
100	1.042E-03	417.79	421.96	1.304
120	1.058E-03	502.14	506.37	1.524
150	1.088E-03	630.02	634.37	1.838
170	1.112E-03	716.51	720.96	2.038
200	1.154E-03	848.82	853.44	2.327
250	1.251E-03	1080.35	1085.35	2.793
300	5.884E-02	2725.34	2960.69	6.361
350	6.645E-02	2826.66	3092.44	6.582
400	7.341E-02	2919.89	3213.53	6.769
450	8.003E-02	3010.14	3330.24	6.936
500	8.643E-02	3099.51	3445.23	7.090
550	9.269E-02	3188.99	3559.74	7.234
600	9.885E-02	3279.08	3674.46	7.369
650	1.049E-01	3370.08	3789.78	7.497
700	1.109E-01	3462.17	3905.96	7.620
800	1.229E-01	3650.13	4141.62	7.850

H2O	$p = 4.5$	[MPa]	Tsat =	257.5 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.980E-04	0.02	4.51	0.000
25	1.001E-03	104.52	109.03	0.366
50	1.010E-03	208.63	213.17	0.702
75	1.024E-03	312.91	317.51	1.013
100	1.041E-03	417.65	422.33	1.303
120	1.058E-03	501.96	506.73	1.524
150	1.088E-03	629.78	634.68	1.837
170	1.111E-03	716.23	721.24	2.037
200	1.153E-03	848.46	853.65	2.326
250	1.250E-03	1079.71	1085.34	2.791
300	5.135E-02	2712.01	2943.08	6.283
350	5.840E-02	2817.80	3080.58	6.513
400	6.475E-02	2913.30	3204.66	6.705
450	7.074E-02	3004.93	3323.24	6.875
500	7.651E-02	3095.24	3439.53	7.030
550	8.213E-02	3185.42	3555.01	7.175
600	8.765E-02	3276.06	3670.48	7.311
650	9.309E-02	3367.49	3786.40	7.440
700	9.847E-02	3459.94	3903.06	7.563
800	1.091E-01	3648.39	4139.41	7.794

H2O	$p = 5.0$	[MPa]	Tsat =	264.0 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.977E-04	0.03	5.02	0.000
25	1.001E-03	104.48	109.49	0.366
50	1.010E-03	208.55	213.60	0.701
75	1.024E-03	312.80	317.92	1.012
100	1.041E-03	417.51	422.71	1.303
120	1.058E-03	501.79	507.08	1.523
150	1.087E-03	629.55	634.99	1.837
170	1.111E-03	715.96	721.51	2.037
200	1.153E-03	848.09	853.85	2.325
250	1.249E-03	1079.08	1085.33	2.790
300	4.532E-02	2697.95	2924.54	6.208
350	5.194E-02	2808.68	3068.40	6.449
400	5.781E-02	2906.59	3195.66	6.646
450	6.330E-02	2999.65	3316.16	6.819
500	6.857E-02	3090.94	3433.78	6.976
550	7.368E-02	3181.84	3550.25	7.122
600	7.869E-02	3273.03	3666.48	7.259
650	8.362E-02	3364.90	3783.00	7.389
700	8.849E-02	3457.69	3900.15	7.512
800	9.811E-02	3646.65	4137.20	7.744

H2O	$p = 6.0$	[MPa]	Tsat =	275.7 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.972E-04	0.04	6.03	0.000
25	1.000E-03	104.41	110.41	0.366
50	1.009E-03	208.40	214.46	0.701
75	1.023E-03	312.58	318.72	1.012
100	1.041E-03	417.22	423.47	1.302
120	1.057E-03	501.44	507.79	1.522
150	1.087E-03	629.09	635.61	1.836
170	1.110E-03	715.41	722.07	2.035
200	1.152E-03	847.36	854.27	2.324
250	1.248E-03	1077.84	1085.32	2.788
300	3.616E-02	2667.23	2884.21	6.067
350	4.223E-02	2789.63	3042.99	6.333
400	4.739E-02	2892.83	3177.19	6.541
450	5.214E-02	2988.92	3301.77	6.719
500	5.665E-02	3082.22	3422.14	6.880
550	6.101E-02	3174.59	3540.63	7.029
600	6.525E-02	3266.91	3658.42	7.168
650	6.942E-02	3359.67	3776.17	7.299
700	7.352E-02	3453.17	3894.30	7.423
800	8.160E-02	3643.15	4132.77	7.657

H2O	$p = 7.0$	[MPa]	Tsat =	285.9 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.967E-04	0.06	7.03	0.000
25	9.998E-04	104.33	111.33	0.366
50	1.009E-03	208.26	215.32	0.700
75	1.023E-03	312.37	319.53	1.011
100	1.040E-03	416.94	424.22	1.301
120	1.057E-03	501.10	508.49	1.521
150	1.086E-03	628.63	636.24	1.835
170	1.109E-03	714.86	722.62	2.034
200	1.151E-03	846.64	854.69	2.322
250	1.246E-03	1076.61	1085.33	2.785
300	2.947E-02	2632.15	2838.41	5.930
350	3.524E-02	2769.36	3016.03	6.228
400	3.993E-02	2878.57	3158.08	6.448
450	4.416E-02	2977.93	3287.06	6.633
500	4.814E-02	3073.35	3410.31	6.797
550	5.195E-02	3167.23	3530.89	6.949
600	5.565E-02	3260.71	3650.28	7.089
650	5.927E-02	3354.39	3769.28	7.222
700	6.283E-02	3448.62	3888.41	7.348
800	6.981E-02	3639.64	4128.32	7.582

H2O	$p = 8.0$	[MPa]	Tsat =	285.1 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.962E-04	0.07	8.04	0.000
25	9.993E-04	104.26	112.25	0.365
50	1.009E-03	208.11	216.18	0.700
75	1.022E-03	312.16	320.34	1.010
100	1.040E-03	416.66	424.97	1.301
120	1.056E-03	500.75	509.20	1.521
150	1.085E-03	628.18	636.86	1.833
170	1.109E-03	714.31	723.18	2.033
200	1.150E-03	845.92	855.12	2.321
250	1.244E-03	1075.40	1085.35	2.783
300	2.426E-02	2590.94	2785.00	5.791
350	2.995E-02	2747.69	2987.32	6.130
400	3.432E-02	2863.77	3138.30	6.363
450	3.817E-02	2966.68	3272.01	6.555
500	4.175E-02	3064.32	3398.29	6.724
550	4.516E-02	3159.78	3521.03	6.878
600	4.845E-02	3254.45	3642.05	7.021
650	5.166E-02	3349.06	3762.34	7.155
700	5.481E-02	3444.03	3882.49	7.281
800	6.097E-02	3636.11	4123.87	7.517

H2O	$p = 10.0$	[MPa]	Tsat =	311.1 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.952E-04	0.09	10.05	0.000
25	9.984E-04	104.11	114.09	0.365
50	1.008E-03	207.82	217.89	0.699
75	1.021E-03	311.74	321.95	1.009
100	1.039E-03	416.10	426.48	1.299
120	1.055E-03	500.07	510.62	1.519
150	1.084E-03	627.28	638.12	1.831
170	1.107E-03	713.23	724.30	2.030
200	1.148E-03	844.50	855.98	2.318
250	1.240E-03	1073.01	1085.42	2.778
300	1.397E-03	1328.35	1342.32	3.247
350	2.242E-02	2699.17	2923.40	5.944
400	2.641E-02	2832.40	3096.48	6.212
450	2.975E-02	2943.34	3240.85	6.419
500	3.279E-02	3045.79	3373.65	6.597
550	3.564E-02	3144.56	3500.94	6.756
600	3.837E-02	3241.71	3625.36	6.903
650	4.101E-02	3338.24	3748.30	7.040
700	4.358E-02	3434.75	3870.54	7.169
800	4.859E-02	3629.00	4114.94	7.408

H2O	$p = 12.5$	[MPa]	Tsat =	327.9 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.940E-04	0.12	12.55	0.000
25	9.973E-04	103.92	116.39	0.364
50	1.007E-03	207.45	220.04	0.698
75	1.020E-03	311.21	323.97	1.008
100	1.037E-03	415.41	428.37	1.297
120	1.054E-03	499.23	512.39	1.517
150	1.083E-03	626.16	639.69	1.829
170	1.105E-03	711.90	725.71	2.027
200	1.146E-03	842.76	857.08	2.314
250	1.236E-03	1070.11	1085.56	2.773
300	1.387E-03	1322.28	1339.62	3.236
350	1.613E-02	2624.59	2826.17	5.712
400	2.000E-02	2789.27	3039.32	6.042
450	2.299E-02	2912.46	3199.80	6.272
500	2.560E-02	3021.70	3341.74	6.462
550	2.801E-02	3124.97	3475.15	6.629
600	3.029E-02	3225.40	3604.07	6.781
650	3.248E-02	3324.46	3730.46	6.922
700	3.460E-02	3422.96	3855.43	7.054
800	3.869E-02	3620.05	4103.72	7.297

H2O	$p = 1.50$	[MPa]	Tsat =	342.3 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.928E-04	0.15	15.04	0.000
25	9.963E-04	103.73	118.68	0.363
50	1.006E-03	207.09	222.18	0.697
75	1.019E-03	310.70	325.98	1.006
100	1.036E-03	414.72	430.26	1.295
120	1.052E-03	498.39	514.17	1.514
150	1.081E-03	625.06	641.28	1.826
170	1.103E-03	710.58	727.14	2.024
200	1.143E-03	841.04	858.19	2.310
250	1.232E-03	1067.29	1085.77	2.767
300	1.377E-03	1316.59	1337.24	3.226
350	1.147E-02	2520.38	2692.44	5.442
400	1.565E-02	2740.72	2975.46	5.881
450	1.845E-02	2879.50	3156.18	6.140
500	2.080E-02	2996.55	3308.55	6.344
550	2.293E-02	3104.73	3448.63	6.520
600	2.491E-02	3208.67	3582.33	6.678
650	2.680E-02	3310.40	3712.34	6.822
700	2.861E-02	3410.97	3840.15	6.957
800	3.210E-02	3611.03	4092.46	7.204

H2O	$p = 17.5$	[MPa]	Tsat =	354.8 °C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.916E-04	0.18	17.53	0.000
25	9.952E-04	103.55	120.96	0.363
50	1.005E-03	206.74	224.32	0.696
75	1.018E-03	310.18	328.00	1.005
100	1.035E-03	414.05	432.16	1.294
120	1.051E-03	497.57	515.96	1.512
150	1.079E-03	623.98	642.86	1.823
170	1.102E-03	709.29	728.57	2.021
200	1.141E-03	839.36	859.32	2.307
250	1.228E-03	1064.55	1086.04	2.762
300	1.368E-03	1311.21	1335.15	3.216
350	1.714E-03	1632.04	1662.03	3.761
400	1.245E-02	2685.01	2902.84	5.721
450	1.517E-02	2844.17	3109.71	6.018
500	1.736E-02	2970.28	3274.05	6.238
550	1.929E-02	3083.87	3421.40	6.423
600	2.106E-02	3191.54	3560.16	6.587
650	2.274E-02	3296.07	3693.96	6.736
700	2.434E-02	3398.82	3824.70	6.874
800	2.738E-02	3601.93	4081.16	7.125

H2O	$p = 20.0$	[MPa]	Tsat =	365.9 C
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.904E-04	0.20	20.00	0.000
25	9.941E-04	103.36	123.24	0.362
50	1.003E-03	206.38	226.45	0.694
75	1.017E-03	309.68	330.01	1.003
100	1.034E-03	413.38	434.05	1.292
120	1.050E-03	496.75	517.74	1.510
150	1.078E-03	622.90	644.46	1.821
170	1.100E-03	708.01	730.01	2.018
200	1.139E-03	837.70	860.48	2.303
250	1.224E-03	1061.87	1086.36	2.757
300	1.360E-03	1306.11	1333.30	3.207
350	1.664E-03	1612.29	1645.57	3.728
400	9.942E-03	2619.25	2818.10	5.554
450	1.270E-02	2806.18	3060.09	5.902
500	1.477E-02	2942.84	3238.21	6.140
550	1.656E-02	3062.37	3393.48	6.335
600	1.818E-02	3174.04	3537.59	6.505
650	1.969E-02	3281.49	3675.35	6.658
700	2.113E-02	3386.50	3809.12	6.799
800	2.385E-02	3592.78	4069.83	7.054

H2O	$p = 25.0$	[MPa]		
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
0	9.880E-04	0.23	24.93	0.000
25	9.920E-04	102.99	127.79	0.361
50	1.001E-03	205.68	230.72	0.692
75	1.015E-03	308.68	334.05	1.000
100	1.031E-03	412.06	437.84	1.288
120	1.047E-03	495.15	521.32	1.506
150	1.075E-03	620.80	647.67	1.816
170	1.096E-03	705.51	732.93	2.012
200	1.134E-03	834.47	862.83	2.296
250	1.217E-03	1056.73	1087.16	2.747
300	1.344E-03	1296.61	1330.21	3.190
350	1.598E-03	1583.56	1623.51	3.680
400	6.004E-03	2430.08	2580.19	5.142
450	9.162E-03	2720.68	2949.73	5.674
500	1.112E-02	2884.33	3162.41	5.959
550	1.272E-02	3017.54	3335.65	6.176
600	1.414E-02	3137.95	3491.39	6.360
650	1.543E-02	3251.67	3637.49	6.523
700	1.665E-02	3361.43	3777.59	6.671
800	1.891E-02	3574.30	4047.11	6.935

H2O	$p = 30.0$	[MPa]			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	
0	9.856E-04	0.25	29.82	0.000	
25	9.899E-04	102.62	132.32	0.359	
50	9.994E-04	205.00	234.98	0.690	
75	1.013E-03	307.70	338.08	0.997	
100	1.029E-03	410.77	441.64	1.284	
120	1.044E-03	493.58	524.91	1.502	
150	1.072E-03	618.75	650.90	1.811	
170	1.093E-03	703.08	735.87	2.007	
200	1.130E-03	831.34	865.25	2.289	
250	1.210E-03	1051.82	1088.13	2.737	
300	1.330E-03	1287.90	1327.81	3.174	
350	1.552E-03	1561.87	1608.42	3.643	
400	2.790E-03	2067.38	2151.08	4.473	
450	6.735E-03	2619.33	2821.38	5.442	
500	8.679E-03	2820.71	3081.06	5.790	
550	1.017E-02	2970.35	3275.39	6.034	
600	1.145E-02	3100.57	3443.94	6.233	
650	1.260E-02	3221.08	3598.96	6.406	
700	1.366E-02	3335.88	3745.71	6.561	
800	1.562E-02	3555.65	4024.34	6.833	

H2O	$p = 35.0$	[MPa]			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	
0	9.833E-04	0.26	34.68	0.000	
25	9.879E-04	102.26	136.83	0.358	
50	9.973E-04	204.32	239.23	0.688	
75	1.010E-03	306.74	342.10	0.994	
100	1.027E-03	409.50	445.44	1.281	
120	1.042E-03	492.05	528.52	1.498	
150	1.069E-03	616.75	654.16	1.806	
170	1.090E-03	700.71	738.86	2.001	
200	1.126E-03	828.31	867.73	2.283	
250	1.204E-03	1047.14	1089.27	2.727	
300	1.318E-03	1279.84	1325.96	3.159	
350	1.516E-03	1544.04	1597.12	3.612	
400	2.100E-03	1914.05	1987.55	4.212	
450	4.962E-03	2498.74	2672.40	5.196	
500	6.927E-03	2751.91	2994.37	5.628	
550	8.345E-03	2920.98	3213.04	5.903	
600	9.527E-03	3062.07	3395.52	6.118	
650	1.057E-02	3189.84	3559.94	6.301	
700	1.153E-02	3309.93	3713.58	6.463	
800	1.328E-02	3536.86	4001.58	6.745	

H2O	$p = 40.0$	[MPa]			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	
0	9.811E-04	0.25	39.50	0.000	
25	9.858E-04	101.90	141.33	0.356	
50	9.953E-04	203.66	243.47	0.685	
75	1.008E-03	305.79	346.13	0.991	
100	1.024E-03	408.27	449.25	1.277	
120	1.040E-03	490.54	532.13	1.494	
150	1.066E-03	614.79	657.43	1.801	
170	1.087E-03	698.40	741.87	1.996	
200	1.122E-03	825.37	870.26	2.276	
250	1.198E-03	1042.65	1090.55	2.718	
300	1.306E-03	1272.33	1324.58	3.145	
350	1.487E-03	1528.75	1588.24	3.586	
400	1.908E-03	1854.54	1930.85	4.113	
450	3.693E-03	2365.11	2512.83	4.946	
500	5.622E-03	2678.40	2903.30	5.470	
550	6.984E-03	2869.73	3149.09	5.778	
600	8.094E-03	3022.65	3346.42	6.011	
650	9.063E-03	3158.08	3520.62	6.205	
700	9.941E-03	3283.68	3681.33	6.375	
800	1.152E-02	3517.94	3978.85	6.666	

H2O	$p = 50.0$	[MPa]			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	
0	9.766E-04	0.20	49.03	-0.001	
25	9.819E-04	101.18	150.27	0.353	
50	9.914E-04	202.36	251.94	0.681	
75	1.004E-03	303.96	354.18	0.985	
100	1.020E-03	405.86	456.87	1.270	
120	1.035E-03	487.63	539.38	1.486	
150	1.061E-03	611.01	664.04	1.791	
170	1.080E-03	693.95	747.98	1.985	
200	1.115E-03	819.73	875.46	2.263	
250	1.186E-03	1034.19	1093.50	2.701	
300	1.286E-03	1258.67	1322.96	3.120	
350	1.441E-03	1503.19	1575.24	3.542	
400	1.731E-03	1788.06	1874.61	4.003	
450	2.486E-03	2159.64	2283.95	4.588	
500	3.892E-03	2525.49	2720.12	5.173	
550	5.118E-03	2763.66	3019.56	5.549	
600	6.112E-03	2942.02	3247.64	5.818	
650	6.966E-03	3093.60	3441.89	6.034	
700	7.727E-03	3230.59	3616.95	6.219	
800	9.076E-03	3479.88	3933.67	6.529	

H2O	$p = 60.0$	[MPa]			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	
0	9.723E-04	0.10	58.44	-0.003	
25	9.780E-04	100.47	159.15	0.350	
50	9.876E-04	201.11	260.37	0.676	
75	1.000E-03	302.19	362.22	0.980	
100	1.016E-03	403.55	464.50	1.263	
120	1.030E-03	484.84	546.66	1.478	
150	1.055E-03	607.39	670.71	1.782	
170	1.075E-03	689.70	754.18	1.975	
200	1.108E-03	814.39	880.85	2.251	
250	1.176E-03	1026.35	1096.89	2.685	
300	1.268E-03	1246.47	1322.55	3.097	
350	1.405E-03	1482.12	1566.41	3.505	
400	1.633E-03	1745.36	1843.37	3.932	
450	2.085E-03	2053.89	2178.99	4.412	
500	2.956E-03	2390.58	2567.93	4.932	
550	3.957E-03	2658.81	2896.21	5.344	
600	4.835E-03	2861.19	3151.26	5.645	
650	5.595E-03	3028.88	3364.60	5.883	
700	6.272E-03	3177.30	3553.61	6.082	
800	7.459E-03	3441.66	3889.18	6.411	

H2O	$p = 70.0$	[MPa]			
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]	
0	9.682E-04	-0.05	67.72	-0.004	
25	9.742E-04	99.78	167.98	0.347	
50	9.839E-04	199.90	268.77	0.672	
75	9.965E-04	300.49	370.24	0.974	
100	1.012E-03	401.32	472.15	1.257	
120	1.026E-03	482.15	553.96	1.470	
150	1.050E-03	603.92	677.44	1.773	
170	1.069E-03	685.64	760.48	1.965	
200	1.101E-03	809.32	886.38	2.240	
250	1.166E-03	1019.02	1100.64	2.670	
300	1.252E-03	1235.44	1323.09	3.076	
350	1.375E-03	1464.12	1560.37	3.473	
400	1.566E-03	1713.14	1822.79	3.877	
450	1.893E-03	1990.15	2122.66	4.307	
500	2.466E-03	2290.58	2463.19	4.762	
550	3.227E-03	2563.90	2789.80	5.172	
600	3.976E-03	2783.45	3061.76	5.493	
650	4.650E-03	2965.40	3290.90	5.748	
700	5.256E-03	3124.59	3492.48	5.961	
800	6.318E-03	3403.51	3845.78	6.307	



**R717 – Ammoniaca**

**Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della temperatura**

Temp.	Press.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna (V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
$T$ [C]	$p$ [MPa]	$v_l$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
-75.00	0.00751	0.00137	12.82	-180.7	1201	-180.7	1297	-0.8265	6.634
-70.00	0.01094	0.00138	9.008	-159.6	1208	-159.6	1307	-0.7211	6.497
-65.00	0.01562	0.00139	6.452	-138.3	1215	-138.3	1316	-0.6175	6.369
-60.00	0.02189	0.00140	4.706	-116.9	1222	-116.8	1325	-0.5157	6.248
-55.00	0.03014	0.00141	3.490	-95.27	1229	-95.23	1334	-0.4157	6.135
-50.00	0.04084	0.00142	2.628	-73.55	1235	-73.49	1342	-0.3172	6.028
-45.00	0.05449	0.00144	2.007	-51.69	1241	-51.61	1351	-0.2203	5.927
-40.00	0.07169	0.00145	1.553	-29.70	1248	-29.59	1359	-0.1250	5.831
-35.00	0.09310	0.00146	1.217	-7.580	1254	-7.443	1367	-0.0311	5.740
-30.00	0.1194	0.00148	0.9640	14.66	1259	14.84	1375	0.06134	5.653
-25.00	0.1515	0.00149	0.7717	37.02	1265	37.25	1382	0.1524	5.571
-20.00	0.1901	0.00150	0.6237	59.50	1270	59.79	1389	0.2421	5.492
-15.00	0.2362	0.00152	0.5087	82.09	1275	82.45	1396	0.3304	5.417
-10.00	0.2907	0.00153	0.4183	104.8	1280	105.2	1402	0.4176	5.345
-5.000	0.3548	0.00155	0.3466	127.6	1285	128.2	1408	0.5035	5.276
0.0	0.4294	0.00157	0.2893	150.6	1289	151.2	1413	0.5883	5.209
5.000	0.5157	0.00158	0.2430	173.6	1293	174.4	1419	0.6720	5.145
10.00	0.6150	0.00160	0.2054	196.8	1297	197.8	1423	0.7547	5.083
15.00	0.7285	0.00162	0.1746	220.1	1300	221.3	1428	0.8364	5.023
20.00	0.8575	0.00164	0.1492	243.6	1303	245.0	1431	0.9172	4.964
25.00	1.003	0.00166	0.1281	267.2	1306	268.9	1435	0.9972	4.907
30.00	1.167	0.00168	0.1105	291.0	1308	293.0	1437	1.076	4.851
35.00	1.351	0.00170	0.09563	315.0	1310	317.3	1440	1.155	4.797
40.00	1.555	0.00173	0.08310	339.2	1312	341.9	1441	1.233	4.743
45.00	1.783	0.00175	0.07245	363.6	1313	366.7	1442	1.310	4.690
50.00	2.034	0.00178	0.06335	388.2	1313	391.9	1442	1.387	4.638
55.00	2.311	0.00180	0.05554	413.2	1313	417.3	1442	1.464	4.586
60.00	2.616	0.00183	0.04880	438.4	1313	443.2	1441	1.541	4.534
65.00	2.949	0.00187	0.04296	464.0	1312	469.5	1438	1.617	4.482
70.00	3.313	0.00190	0.03787	490.0	1310	496.3	1435	1.694	4.430
75.00	3.710	0.00194	0.03342	516.4	1307	523.6	1431	1.771	4.377
80.00	4.142	0.00198	0.02951	543.4	1303	551.6	1426	1.848	4.323
85.00	4.610	0.00202	0.02606	571.0	1299	580.3	1419	1.926	4.267
90.00	5.117	0.00207	0.02300	599.2	1293	609.8	1410	2.005	4.210
95.00	5.664	0.00213	0.02027	628.4	1285	640.4	1400	2.086	4.149
100.0	6.255	0.00219	0.01782	658.5	1276	672.2	1388	2.168	4.086
105.0	6.892	0.00226	0.01561	690.0	1265	705.6	1373	2.253	4.017
110.0	7.578	0.00235	0.01360	723.1	1251	740.9	1354	2.342	3.943
115.0	8.317	0.00246	0.01174	758.5	1234	779.0	1331	2.436	3.858
120.0	9.112	0.00259	0.00999	797.5	1210	821.2	1301	2.539	3.760
125.0	9.970	0.00279	0.00828	843.1	1178	870.9	1260	2.658	3.637
130.0	10.90	0.00320	0.00638	908.4	1121	943.3	1191	2.832	3.445

**R717 – Ammoniaca**  
**Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della pressione**

Press.	Temp.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna (V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
$p$ [MPa]	$T$ [C]	$v_l$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
0.030	-55.08	0.00141	3.505	-95.61	1229	-95.57	1334	-0.4172	6.137
0.040	-50.35	0.00142	2.679	-75.07	1235	-75.01	1342	-0.324	6.035
0.050	-46.52	0.00143	2.175	-58.34	1240	-58.27	1348	-0.2496	5.957
0.060	-43.27	0.00144	1.834	-44.11	1244	-44.02	1354	-0.1872	5.893
0.070	-40.45	0.00145	1.588	-31.66	1247	-31.56	1358	-0.1334	5.839
0.080	-37.93	0.00145	1.402	-20.56	1250	-20.44	1362	-0.08595	5.793
0.090	-35.66	0.00146	1.256	-10.51	1253	-10.38	1366	-0.04343	5.752
0.100	-33.59	0.00147	1.138	-1.312	1255	-1.166	1369	-0.00486	5.715
0.110	-31.68	0.00147	1.041	7.188	1258	7.35	1372	0.03049	5.682
0.120	-29.9	0.00148	0.9597	15.1	1260	15.28	1375	0.06314	5.652
0.130	-28.24	0.00148	0.8904	22.51	1261	22.7	1377	0.0935	5.624
0.140	-26.68	0.00148	0.8307	29.49	1263	29.69	1379	0.1219	5.598
0.150	-25.21	0.00149	0.7788	36.08	1265	36.3	1382	0.1486	5.574
0.160	-23.81	0.00149	0.7331	42.34	1266	42.58	1384	0.1738	5.552
0.170	-22.49	0.0015	0.6926	48.31	1268	48.56	1385	0.1976	5.531
0.180	-21.22	0.0015	0.6564	54	1269	54.27	1387	0.2203	5.511
0.190	-20.01	0.0015	0.624	59.46	1270	59.74	1389	0.2419	5.493
0.200	-18.85	0.00151	0.5946	64.7	1272	65	1390	0.2625	5.475
0.225	-16.13	0.00151	0.5324	76.95	1274	77.3	1394	0.3105	5.434
0.250	-13.65	0.00152	0.4822	88.2	1277	88.58	1397	0.3541	5.398
0.275	-11.36	0.00153	0.4408	98.62	1279	99.04	1400	0.394	5.364
0.300	-9.224	0.00154	0.4061	108.3	1281	108.8	1403	0.431	5.334
0.325	-7.226	0.00154	0.3765	117.4	1283	117.9	1405	0.4654	5.306
0.350	-5.346	0.00155	0.3511	126	1285	126.6	1408	0.4976	5.281
0.375	-3.568	0.00155	0.3289	134.2	1286	134.8	1410	0.5279	5.257
0.400	-1.881	0.00156	0.3094	141.9	1288	142.5	1411	0.5565	5.234
0.500	4.14	0.00158	0.2503	169.6	1293	170.4	1418	0.6577	5.156
0.600	9.285	0.0016	0.2104	193.5	1296	194.4	1423	0.7429	5.092
0.700	13.8	0.00161	0.1815	214.5	1300	215.7	1427	0.8169	5.037
0.800	17.85	0.00163	0.1596	233.5	1302	234.8	1430	0.8825	4.989
0.900	21.52	0.00164	0.1424	250.8	1304	252.3	1432	0.9416	4.947
1.000	24.9	0.00166	0.1285	266.7	1306	268.4	1435	0.9955	4.908
1.200	30.94	0.00168	0.1075	295.5	1309	297.5	1438	1.091	4.841
1.400	36.25	0.00171	0.0923	321	1311	323.4	1440	1.174	4.783
1.600	41.02	0.00173	0.08078	344.2	1312	346.9	1441	1.249	4.732
1.800	45.36	0.00175	0.07174	365.4	1313	368.5	1442	1.316	4.687
2.000	49.35	0.00177	0.06445	385	1313	388.6	1442	1.377	4.645
2.200	53.05	0.00179	0.05844	403.4	1314	407.4	1442	1.434	4.606
2.400	56.51	0.00181	0.0534	420.7	1313	425.1	1442	1.487	4.57
2.600	59.75	0.00183	0.04911	437.2	1313	441.9	1441	1.537	4.537
2.800	62.82	0.00185	0.0454	452.8	1312	458	1439	1.584	4.505
3.000	65.72	0.00187	0.04217	467.7	1311	473.3	1438	1.628	4.475
3.500	72.4	0.00192	0.03566	502.6	1308	509.3	1433	1.731	4.404
4.000	78.4	0.00196	0.03071	534.7	1305	542.6	1427	1.823	4.34
4.500	83.86	0.00201	0.02681	564.6	1300	573.7	1420	1.908	4.28
5.000	88.88	0.00206	0.02365	592.9	1294	603.2	1412	1.987	4.223
5.500	93.54	0.00211	0.02103	619.8	1288	631.4	1403	2.062	4.167
6.000	97.89	0.00216	0.01882	645.6	1280	658.6	1393	2.133	4.113
6.500	102	0.00222	0.01693	670.7	1272	685.1	1382	2.201	4.06
7.000	105.8	0.00228	0.01527	695.2	1263	711.2	1370	2.267	4.006
7.500	109.4	0.00234	0.01381	719.4	1253	736.9	1357	2.332	3.951
8.000	112.9	0.00241	0.0125	743.3	1242	762.6	1342	2.395	3.895
8.500	116.2	0.00249	0.01132	767.4	1229	788.5	1325	2.459	3.837
9.000	119.3	0.00257	0.01023	791.9	1214	815	1306	2.524	3.775
9.500	122.3	0.00268	0.00921	817.4	1197	842.8	1284	2.591	3.708
10.000	125.2	0.0028	0.00823	844.8	1176	872.8	1259	2.663	3.632
10.500	127.9	0.00298	0.00724	876.2	1150	907.5	1226	2.746	3.541

**R717 – Ammoniaca: Liquido compresso e vapore surriscaldato.**

R717	p =	0.06	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.56	-73.47	-0.3172
-40.00	1.863	1249	1361	5.924
-30.00	1.949	1266	1383	6.016
-20.00	2.034	1282	1404	6.103
-10.00	2.119	1299	1426	6.186
0.0	2.203	1315	1447	6.266
10.00	2.286	1331	1468	6.342
20.00	2.369	1348	1490	6.416
30.00	2.452	1364	1511	6.488
40.00	2.535	1380	1532	6.557
50.00	2.618	1397	1554	6.625
60.00	2.700	1414	1576	6.691
70.00	2.782	1430	1597	6.755
80.00	2.864	1447	1619	6.818
90.00	2.946	1465	1641	6.880
100.0	3.028	1482	1664	6.940
110.0	3.110	1499	1686	6.999
120.0	3.192	1517	1708	7.057
140.0	3.356	1553	1754	7.170
150.0	3.437	1571	1777	7.226
160.0	3.519	1589	1801	7.280
170.0	3.601	1608	1824	7.334
180.0	3.682	1627	1848	7.387
190.0	3.764	1646	1872	7.439
200.0	3.846	1665	1896	7.490

R717	p =	0.08	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.57	-73.46	-0.3173
-40.00	0.00145	-29.7	-29.59	-0.125
-30.00	1.454	1264	1380	5.867
-20.00	1.519	1281	1402	5.956
-10.00	1.583	1297	1424	6.04
0.0	1.647	1314	1445	6.12
10.00	1.71	1330	1467	6.198
20.00	1.773	1347	1488	6.272
30.00	1.836	1363	1510	6.344
40.00	1.898	1380	1531	6.414
50.00	1.96	1396	1553	6.482
60.00	2.022	1413	1575	6.548
70.00	2.084	1430	1597	6.613
80.00	2.146	1447	1619	6.676
90.00	2.208	1464	1641	6.738
100.0	2.269	1481	1663	6.798
110.0	2.331	1499	1685	6.858
120.0	2.392	1517	1708	6.916
140.0	2.515	1552	1754	7.029
150.0	2.577	1571	1777	7.084
160.0	2.638	1589	1800	7.139
170.0	2.699	1608	1824	7.193
180.0	2.761	1627	1847	7.246
190.0	2.822	1646	1871	7.298
200.0	2.883	1665	1895	7.349

R717	p =	0.1	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.58	-73.44	-0.3173
-40.00	0.00145	-29.72	-29.57	-0.125
-30.00	1.157	1262	1377	5.749
-20.00	1.21	1279	1400	5.84
-10.00	1.262	1296	1422	5.925
0.0	1.314	1312	1444	6.007
10.00	1.365	1329	1465	6.085
20.00	1.415	1346	1487	6.16
30.00	1.466	1362	1509	6.233
40.00	1.516	1379	1530	6.303
50.00	1.566	1396	1552	6.371
60.00	1.616	1412	1574	6.438
70.00	1.665	1429	1596	6.502
80.00	1.715	1446	1618	6.566
90.00	1.764	1464	1640	6.628
100.0	1.814	1481	1662	6.688
110.0	1.863	1498	1685	6.748
120.0	1.912	1516	1707	6.806
140.0	2.011	1552	1753	6.919
150.0	2.06	1570	1776	6.975
160.0	2.109	1589	1800	7.029
170.0	2.158	1607	1823	7.083
180.0	2.208	1626	1847	7.136
190.0	2.257	1645	1871	7.188
200.0	2.306	1665	1895	7.24

R717	p =	0.2	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.63	-73.35	-0.3176
-40.00	0.00145	-29.77	-29.48	-0.1253
-30.00	0.00148	14.61	14.9	0.06112
-20.00	0.0015	59.49	59.79	0.242
-10.00	0.6193	1288	1412	5.557
0.0	0.6465	1306	1435	5.644
10.00	0.6732	1323	1458	5.726
20.00	0.6995	1341	1481	5.805
30.00	0.7255	1358	1503	5.88
40.00	0.7512	1375	1525	5.952
50.00	0.7768	1392	1547	6.022
60.00	0.8022	1409	1570	6.09
70.00	0.8275	1427	1592	6.156
80.00	0.8527	1444	1614	6.22
90.00	0.8778	1461	1637	6.283
100.0	0.9028	1479	1659	6.344
110.0	0.9278	1496	1682	6.404
120.0	0.9527	1514	1705	6.463
140.0	1.002	1550	1751	6.577
150.0	1.027	1569	1774	6.633
160.0	1.052	1587	1798	6.688
170.0	1.077	1606	1821	6.742
180.0	1.101	1625	1845	6.795
190.0	1.126	1644	1869	6.847
200.0	1.151	1663	1894	6.899

R717	$p =$	0.4	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.74	-73.17	-0.3181
-40.00	0.00145	-29.89	-29.31	-0.1258
-30.00	0.00147	14.48	15.07	0.06057
-20.00	0.0015	59.34	59.95	0.2414
-10.00	0.00153	104.7	105.3	0.4172
0.0	0.3122	1291	1416	5.252
10.00	0.327	1311	1442	5.345
20.00	0.3412	1330	1467	5.43
30.00	0.3551	1349	1491	5.511
40.00	0.3688	1367	1515	5.588
50.00	0.3822	1385	1538	5.662
60.00	0.3955	1403	1561	5.732
70.00	0.4086	1421	1584	5.801
80.00	0.4216	1439	1607	5.867
90.00	0.4345	1456	1630	5.931
100.0	0.4473	1474	1653	5.994
110.0	0.4601	1492	1676	6.055
120.0	0.4728	1511	1700	6.115
140.0	0.4981	1547	1746	6.231
150.0	0.5107	1566	1770	6.287
160.0	0.5232	1584	1794	6.343
170.0	0.5358	1603	1818	6.397
180.0	0.5483	1622	1842	6.451
190.0	0.5607	1642	1866	6.504
200.0	0.5732	1661	1890	6.556

R717	$p =$	0.6	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.85	-72.99	-0.3185
-40.00	0.00145	-30.01	-29.14	-0.1263
-30.00	0.00147	14.34	15.23	0.06003
-20.00	0.0015	59.2	60.1	0.2409
-10.00	0.00153	104.5	105.5	0.4166
0.0	0.00157	150.4	151.3	0.5877
10.00	0.2111	1298	1425	5.099
20.00	0.2215	1319	1452	5.194
30.00	0.2315	1339	1478	5.281
40.00	0.2411	1359	1503	5.363
50.00	0.2505	1378	1528	5.441
60.00	0.2598	1396	1552	5.515
70.00	0.2689	1415	1576	5.585
80.00	0.2778	1433	1600	5.654
90.00	0.2867	1452	1624	5.72
100.0	0.2955	1470	1647	5.784
110.0	0.3042	1488	1671	5.846
120.0	0.3128	1507	1694	5.907
140.0	0.33	1544	1742	6.025
150.0	0.3385	1563	1766	6.082
160.0	0.347	1582	1790	6.138
170.0	0.3555	1601	1814	6.193
180.0	0.3639	1620	1838	6.247
190.0	0.3723	1639	1863	6.3
200.0	0.3807	1659	1887	6.353

R717	$p =$	0.8	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-73.95	-72.81	-0.319
-40.00	0.00145	-30.13	-28.97	-0.1268
-30.00	0.00147	14.21	15.39	0.05948
-20.00	0.0015	59.05	60.25	0.2403
-10.00	0.00153	104.4	105.6	0.416
0.0	0.00157	150.2	151.5	0.587
10.00	0.0016	196.6	197.9	0.754
20.00	0.1614	1307	1436	5.011
30.00	0.1694	1329	1465	5.107
40.00	0.1772	1350	1492	5.194
50.00	0.1846	1370	1518	5.276
60.00	0.1919	1390	1543	5.353
70.00	0.1989	1409	1568	5.427
80.00	0.2059	1428	1593	5.498
90.00	0.2127	1447	1617	5.565
100.0	0.2195	1465	1641	5.631
110.0	0.2262	1484	1665	5.695
120.0	0.2328	1503	1689	5.757
140.0	0.2459	1541	1737	5.876
150.0	0.2524	1560	1761	5.934
160.0	0.2589	1579	1786	5.991
170.0	0.2653	1598	1810	6.046
180.0	0.2717	1617	1835	6.101
190.0	0.2781	1637	1859	6.155
200.0	0.2844	1656	1884	6.208

R717	$p =$	1	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-74.06	-72.64	-0.3195
-40.00	0.00145	-30.25	-28.8	-0.1273
-30.00	0.00147	14.08	15.55	0.05894
-20.00	0.0015	58.9	60.41	0.2397
-10.00	0.00153	104.2	105.7	0.4154
0.0	0.00157	150	151.6	0.5864
10.00	0.0016	196.4	198	0.7533
20.00	0.00164	243.4	245.1	0.9166
30.00	0.132	1318	1450	4.96
40.00	0.1387	1341	1479	5.055
50.00	0.145	1362	1507	5.142
60.00	0.151	1383	1534	5.223
70.00	0.1569	1403	1560	5.3
80.00	0.1627	1422	1585	5.372
90.00	0.1683	1442	1610	5.442
100.0	0.1739	1461	1635	5.51
110.0	0.1794	1480	1659	5.575
120.0	0.1848	1499	1684	5.638
130.0	0.1901	1518	1708	5.699
140.0	0.1955	1537	1733	5.759
150.0	0.2007	1556	1757	5.818
160.0	0.206	1576	1782	5.875
170.0	0.2112	1595	1806	5.931
180.0	0.2164	1615	1831	5.986
190.0	0.2215	1634	1856	6.04
200.0	0.2267	1654	1881	6.094

R717	$p =$	2	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-74.59	-71.74	-0.3218
-40.00	0.00145	-30.84	-27.94	-0.1299
-30.00	0.00147	13.42	16.37	0.05623
-20.00	0.0015	58.17	61.17	0.2368
-10.00	0.00153	103.4	106.5	0.4122
0.0	0.00156	149.1	152.2	0.583
10.00	0.0016	195.4	198.6	0.7496
20.00	0.00164	242.3	245.6	0.9126
30.00	0.00168	289.9	293.3	1.073
40.00	0.00172	338.5	342	1.231
50.00	0.00177	384.8	384.8	1.376
60.00	0.00183	435.5	435.5	1.532
70.00	0.0019	488.2	488.2	1.688
80.00	0.00197	542.7	542.7	1.844
90.00	0.00205	599.1	599.1	2.001
100.0	0.00214	657.4	657.4	2.159
110.0	0.00224	717.6	717.6	2.318
120.0	0.00235	779.7	779.7	2.478
130.0	0.00247	843.7	843.7	2.639
140.0	0.0026	909.6	909.6	2.801
150.0	0.00274	977.4	977.4	2.964
160.0	0.0029	1047.1	1047.1	3.128
170.0	0.00307	1118.7	1118.7	3.293
180.0	0.00326	1192.2	1192.2	3.459
190.0	0.00347	1267.6	1267.6	3.626
200.0	0.0037	1344.9	1344.9	3.794

R717	$p =$	4	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-75.63	-69.95	-0.3265
-40.00	0.00145	-32	-26.22	-0.1349
-30.00	0.00147	12.12	18.01	0.05086
-20.00	0.0015	56.72	62.72	0.2311
-10.00	0.00153	101.8	107.9	0.4061
0.0	0.00156	147.3	153.6	0.5764
10.00	0.00159	193.4	199.7	0.7424
20.00	0.00163	240	246.5	0.9048
30.00	0.00167	287.3	294	1.064
40.00	0.00172	335.5	342.4	1.221
50.00	0.00177	384.8	391.8	1.376
60.00	0.00183	435.5	442.8	1.532
70.00	0.0019	488.2	495.8	1.688
80.00	0.00197	542.7	549.8	1.844
90.00	0.00205	599.1	603.8	2.001
100.0	0.00214	657.4	659.8	2.159
110.0	0.00224	717.6	719.8	2.318
120.0	0.00235	779.7	781.8	2.478
130.0	0.00247	843.7	843.8	2.639
140.0	0.0026	909.6	905.8	2.801
150.0	0.00274	977.4	967.8	2.964
160.0	0.0029	1047.1	1029.8	3.128
170.0	0.00307	1118.7	1091.8	3.293
180.0	0.00326	1192.2	1153.8	3.459
190.0	0.00347	1267.6	1215.8	3.626
200.0	0.0037	1344.9	1277.8	3.794

R717	$p =$	6	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-76.66	-68.14	-0.3312
-40.00	0.00144	-33.15	-24.49	-0.1399
-30.00	0.00147	10.84	19.66	0.04555
-20.00	0.0015	55.3	64.28	0.2254
-10.00	0.00153	100.2	109.4	0.4
0.0	0.00156	145.5	154.9	0.5698
10.00	0.00159	191.4	200.9	0.7353
20.00	0.00163	237.8	247.5	0.8971
30.00	0.00167	284.8	294.8	1.056
40.00	0.00171	332.6	342.8	1.212
50.00	0.00176	381.4	391.9	1.366
60.00	0.00182	431.5	442.3	1.519
70.00	0.00188	483.3	494.6	1.674
80.00	0.00196	537.6	549.3	1.831
90.00	0.00206	595.6	607.9	1.995
100.0	0.00218	657.4	668.9	2.165
110.0	0.00232	723.1	733.9	2.341
120.0	0.00248	792.7	800.7	2.522
130.0	0.00266	866.4	873.4	2.709
140.0	0.00286	944.2	951.2	2.902
150.0	0.00308	1026.1	1034.1	3.101
160.0	0.00332	1112.2	1121.2	3.306
170.0	0.00358	1202.5	1213.5	3.517
180.0	0.00386	1297	1305	3.734
190.0	0.00416	1395.6	1401.6	3.957
200.0	0.00448	1498.7	1502.7	4.186

R717	$p =$	8	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00142	-77.68	-66.34	-0.3358
-40.00	0.00144	-34.29	-22.76	-0.1448
-30.00	0.00147	9.579	21.31	0.04029
-20.00	0.00149	53.89	65.84	0.2198
-10.00	0.00152	98.64	110.8	0.394
0.0	0.00155	143.8	156.2	0.5634
10.00	0.00159	189.4	202.1	0.7284
20.00	0.00162	235.6	248.6	0.8895
30.00	0.00166	282.3	295.6	1.047
40.00	0.0017	329.7	343.4	1.202
50.00	0.00175	378.1	392.1	1.356
60.00	0.00181	427.6	442.1	1.508
70.00	0.00187	478.6	493.6	1.66
80.00	0.00194	531.8	547.3	1.814
90.00	0.00203	587.9	604.2	1.973
100.0	0.00215	648.9	666.1	2.141
110.0	0.00233	719.3	737.9	2.331
120.0	0.01432	1293	1407	4.064
130.0	0.01617	1344	1473	4.229
140.0	0.01767	1384	1525	4.358
150.0	0.01899	1419	1571	4.467
160.0	0.02018	1451	1613	4.564
170.0	0.02128	1481	1651	4.652
180.0	0.02232	1509	1688	4.733
190.0	0.0233	1536	1723	4.81
200.0	0.02425	1563	1757	4.882

**R134a –  
Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della temperatura**

Temp.	Press.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna (V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
T [C]	p [MPa]	$v_f$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_f$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
-50.0	0.02945	0.00069	0.6062	-30.16	184	-30.14	201.8	-0.128	0.9115
-47.5	0.03401	0.00069	0.5298	-27.06	185.4	-27.03	203.4	-0.1142	0.9071
-45.0	0.03912	0.0007	0.4647	-23.95	186.8	-23.92	205	-0.1005	0.9029
-42.5	0.04483	0.0007	0.409	-20.83	188.3	-20.8	206.6	-0.08693	0.899
-40.0	0.05121	0.00071	0.3611	-17.7	189.7	-17.67	208.2	-0.07344	0.8953
-37.5	0.05829	0.00071	0.3198	-14.56	191.1	-14.52	209.8	-0.06004	0.8918
-35.0	0.06614	0.00071	0.284	-11.41	192.6	-11.37	211.4	-0.04675	0.8885
-32.5	0.07482	0.00072	0.253	-8.251	194	-8.198	212.9	-0.03354	0.8854
-30.0	0.08438	0.00072	0.2259	-5.079	195.4	-5.018	214.5	-0.02042	0.8824
-27.5	0.09488	0.00072	0.2023	-1.895	196.9	-1.826	216.1	-0.00739	0.8797
-25.0	0.1064	0.00073	0.1816	1.3	198.3	1.378	217.6	0.00555	0.877
-22.5	0.119	0.00073	0.1634	4.508	199.7	4.595	219.2	0.01841	0.8746
-20.0	0.1327	0.00074	0.1474	7.728	201.2	7.826	220.7	0.0312	0.8723
-17.5	0.1477	0.00074	0.1332	10.96	202.6	11.07	222.3	0.04391	0.8701
-15.0	0.1639	0.00074	0.1207	14.21	204	14.33	223.8	0.05654	0.868
-12.5	0.1816	0.00075	0.1095	17.46	205.5	17.6	225.3	0.0691	0.8661
-10.0	0.2006	0.00075	0.09959	20.74	206.9	20.89	226.9	0.0816	0.8643
-7.5	0.2212	0.00076	0.09073	24.02	208.3	24.19	228.4	0.09403	0.8626
-5.0	0.2433	0.00076	0.0828	27.32	209.7	27.51	229.8	0.1064	0.861
-2.5	0.2672	0.00077	0.07569	30.63	211.1	30.84	231.3	0.1187	0.8595
0.0	0.2928	0.00077	0.06931	33.96	212.5	34.19	232.8	0.131	0.858
2.5	0.3203	0.00078	0.06356	37.31	213.9	37.56	234.2	0.1431	0.8567
5.0	0.3497	0.00078	0.05837	40.67	215.3	40.94	235.7	0.1553	0.8554
7.5	0.3811	0.00079	0.05369	44.04	216.6	44.35	237.1	0.1674	0.8542
10.0	0.4146	0.00079	0.04944	47.44	218	47.77	238.5	0.1794	0.8531
12.5	0.4503	0.0008	0.04559	50.85	219.4	51.21	239.9	0.1914	0.852
15.0	0.4884	0.0008	0.04209	54.28	220.7	54.67	241.3	0.2034	0.8509
17.5	0.5288	0.00081	0.0389	57.72	222	58.15	242.6	0.2153	0.8499
20.0	0.5717	0.00082	0.036	61.19	223.4	61.66	243.9	0.2272	0.849
22.5	0.6172	0.00082	0.03334	64.68	224.7	65.18	245.2	0.239	0.8481
25.0	0.6654	0.00083	0.03091	68.18	226	68.74	246.5	0.2509	0.8472
27.5	0.7163	0.00084	0.02869	71.71	227.2	72.31	247.8	0.2627	0.8463
30.0	0.7702	0.00084	0.02664	75.26	228.5	75.91	249	0.2745	0.8454
32.5	0.827	0.00085	0.02476	78.84	229.7	79.54	250.2	0.2862	0.8446
35.0	0.887	0.00086	0.02303	82.44	230.9	83.2	251.4	0.298	0.8437
37.5	0.9501	0.00086	0.02144	86.06	232.1	86.88	252.5	0.3097	0.8429
40.0	1.017	0.00087	0.01997	89.71	233.3	90.6	253.6	0.3214	0.842
42.5	1.086	0.00088	0.0186	93.39	234.5	94.35	254.7	0.3332	0.8411
45.0	1.16	0.00089	0.01734	97.1	235.6	98.13	255.7	0.3449	0.8402
47.5	1.237	0.0009	0.01617	100.8	236.7	102	256.7	0.3566	0.8392
50.0	1.318	0.00091	0.01509	104.6	237.7	105.8	257.6	0.3684	0.8382
52.5	1.403	0.00092	0.01408	108.4	238.8	109.7	258.5	0.3802	0.8371
55.0	1.492	0.00093	0.01314	112.3	239.7	113.7	259.3	0.392	0.836
57.5	1.584	0.00094	0.01226	116.2	240.7	117.7	260.1	0.4039	0.8347
60.0	1.682	0.00095	0.01144	120.1	241.6	121.7	260.8	0.4158	0.8334
62.5	1.784	0.00096	0.01068	124.1	242.4	125.8	261.5	0.4277	0.8319
65.0	1.89	0.00097	0.00996	128.1	243.2	130	262	0.4398	0.8303
67.5	2.001	0.00099	0.00929	132.2	243.9	134.2	262.5	0.4519	0.8285
70.0	2.117	0.001	0.00865	136.3	244.5	138.5	262.8	0.4641	0.8266
72.5	2.238	0.00102	0.00806	140.6	245.1	142.8	263.1	0.4765	0.8244
75.0	2.364	0.00104	0.00749	144.9	245.5	147.3	263.2	0.489	0.8219
77.5	2.496	0.00106	0.00696	149.3	245.8	151.9	263.2	0.5017	0.8191
80.0	2.633	0.00108	0.00645	153.7	246	156.6	263	0.5146	0.8159
82.5	2.776	0.0011	0.00596	158.4	246	161.4	262.6	0.5278	0.8123
85.0	2.926	0.00113	0.0055	163.1	245.9	166.4	261.9	0.5413	0.8081
87.5	3.082	0.00116	0.00505	168.1	245.4	171.6	261	0.5553	0.8031
90.0	3.244	0.00119	0.00461	173.2	244.6	177.1	259.6	0.57	0.7971
92.5	3.414	0.00124	0.00418	178.8	243.4	183	257.7	0.5855	0.7897
95.0	3.591	0.00129	0.00374	184.8	241.4	189.4	254.9	0.6025	0.7802
97.5	3.777	0.00138	0.00328	191.7	238.1	196.9	250.5	0.6221	0.7667
100.0	3.972	0.00154	0.00268	201.4	231.2	207.5	241.9	0.6497	0.7419

**R134a –  
Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della pressione**

Press.	Temp.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna( V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
$p$ [MPa]	$T$ [C]	$v_l$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
0.03	-49.68	0.00069	0.5958	-29.76	184.2	-29.74	202	-0.1263	0.911
0.04	-44.60	0.0007	0.4551	-23.45	187.1	-23.42	205.3	-0.09832	0.9023
0.05	-40.45	0.0007	0.3693	-18.27	189.4	-18.24	207.9	-0.07588	0.8959
0.06	-36.93	0.00071	0.3112	-13.85	191.5	-13.81	210.1	-0.05703	0.891
0.07	-33.86	0.00071	0.2693	-9.97	193.2	-9.92	212.1	-0.0407	0.887
0.08	-31.12	0.00072	0.2376	-6.496	194.8	-6.438	213.8	-0.02626	0.8837
0.09	-28.63	0.00072	0.2126	-3.34	196.2	-3.275	215.4	-0.01329	0.8809
0.10	-26.36	0.00073	0.1926	-0.4409	197.5	-0.3683	216.8	-0.00149	0.8784
0.11	-24.26	0.00073	0.176	2.245	198.7	2.326	218.1	0.00935	0.8763
0.12	-22.31	0.00073	0.1621	4.753	199.9	4.841	219.3	0.01939	0.8744
0.13	-20.48	0.00074	0.1503	7.108	200.9	7.203	220.4	0.02874	0.8727
0.14	-18.76	0.00074	0.1401	9.33	201.9	9.433	221.5	0.03751	0.8712
0.15	-17.13	0.00074	0.1313	11.44	202.8	11.55	222.5	0.04577	0.8698
0.16	-15.59	0.00074	0.1235	13.44	203.7	13.56	223.5	0.05358	0.8685
0.18	-12.71	0.00075	0.1104	17.19	205.3	17.32	225.2	0.06804	0.8663
0.20	-10.08	0.00075	0.09988	20.64	206.8	20.79	226.8	0.08122	0.8644
0.22	-7.64	0.00076	0.09119	23.84	208.2	24.01	228.3	0.09335	0.8627
0.24	-5.37	0.00076	0.08391	26.84	209.5	27.02	229.6	0.1046	0.8612
0.26	-3.24	0.00077	0.0777	29.66	210.7	29.86	230.9	0.1151	0.8599
0.28	-1.23	0.00077	0.07236	32.33	211.8	32.54	232.1	0.1249	0.8587
0.30	0.67	0.00077	0.0677	34.86	212.9	35.09	233.2	0.1342	0.8577
0.32	2.48	0.00078	0.06361	37.28	213.9	37.53	234.2	0.143	0.8567
0.34	4.20	0.00078	0.05998	39.59	214.8	39.85	235.2	0.1514	0.8558
0.36	5.84	0.00078	0.05674	41.8	215.7	42.08	236.2	0.1594	0.855
0.40	8.93	0.00079	0.05121	45.98	217.4	46.3	237.9	0.1743	0.8535
0.45	12.48	0.0008	0.04562	50.82	219.4	51.18	239.9	0.1913	0.852
0.50	15.73	0.00081	0.04112	55.29	221.1	55.69	241.7	0.2069	0.8506
0.55	18.75	0.00081	0.03741	59.46	222.7	59.91	243.3	0.2213	0.8495
0.60	21.57	0.00082	0.0343	63.38	224.2	63.87	244.8	0.2346	0.8484
0.65	24.22	0.00083	0.03165	67.08	225.6	67.62	246.1	0.2472	0.8475
0.70	26.71	0.00083	0.02937	70.6	226.8	71.18	247.4	0.259	0.8466
0.80	31.33	0.00085	0.02562	77.16	229.1	77.84	249.6	0.2807	0.845
0.90	35.53	0.00086	0.02269	83.2	231.2	83.97	251.6	0.3004	0.8436
1.00	39.39	0.00087	0.02032	88.82	233	89.69	253.4	0.3186	0.8422
1.10	42.97	0.00088	0.01836	94.09	234.7	95.06	254.9	0.3354	0.8409
1.20	46.31	0.00089	0.01672	99.06	236.2	100.1	256.2	0.3511	0.8397
1.30	49.46	0.00091	0.01532	103.8	237.5	105	257.4	0.3658	0.8384
1.40	52.42	0.00092	0.01411	108.3	238.7	109.6	258.5	0.3798	0.8372
1.50	55.23	0.00093	0.01306	112.6	239.8	114	259.4	0.3931	0.8359
1.60	57.91	0.00094	0.01213	116.8	240.8	118.3	260.2	0.4058	0.8345
1.70	60.46	0.00095	0.0113	120.8	241.7	122.4	260.9	0.4179	0.8331
1.80	62.90	0.00096	0.01056	124.7	242.5	126.4	261.5	0.4296	0.8317
1.90	65.23	0.00098	0.0099	128.5	243.3	130.3	262.1	0.4409	0.8301
2.00	67.48	0.00099	0.00929	132.2	243.9	134.1	262.5	0.4518	0.8285
2.10	69.64	0.001	0.00874	135.8	244.4	137.9	262.8	0.4624	0.8268
2.20	71.73	0.00101	0.00824	139.3	244.9	141.5	263	0.4727	0.8251
2.30	73.74	0.00103	0.00777	142.7	245.3	145.1	263.2	0.4827	0.8232
2.40	75.69	0.00104	0.00734	146.1	245.6	148.6	263.2	0.4925	0.8212
2.50	77.58	0.00106	0.00694	149.4	245.8	152	263.2	0.5021	0.819
2.60	79.41	0.00107	0.00657	152.7	246	155.5	263.1	0.5115	0.8167
2.70	81.18	0.00109	0.00622	155.9	246.1	158.8	262.8	0.5208	0.8143
2.80	82.90	0.0011	0.00589	159.1	246	162.2	262.5	0.5299	0.8117
2.90	84.58	0.00112	0.00558	162.3	245.9	165.6	262.1	0.539	0.8088
3.00	86.20	0.00114	0.00528	165.5	245.7	168.9	261.5	0.548	0.8058
3.10	87.79	0.00116	0.005	168.6	245.3	172.2	260.8	0.557	0.8025
3.20	89.33	0.00118	0.00473	171.8	244.9	175.6	260	0.566	0.7988
3.30	90.83	0.00121	0.00447	175	244.3	179	259	0.5751	0.7949
3.40	92.30	0.00123	0.00422	178.3	243.5	182.5	257.8	0.5842	0.7904
3.50	93.73	0.00126	0.00397	181.6	242.5	186.1	256.4	0.5936	0.7854
3.60	95.12	0.0013	0.00372	185.1	241.3	189.8	254.7	0.6034	0.7797
3.80	97.80	0.00139	0.00321	192.7	237.6	198	249.8	0.6248	0.7646
4.00	100.3	0.00158	0.00256	203.4	229.3	209.8	239.6	0.6557	0.7355

**R134a – Liquido compresso e vapore surriscaldato.**

R134a	$p =$	0.03	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.16	-30.14	-0.128
-40.0	0.6235	190.4	209.1	0.9417
-30.0	0.6519	196.9	216.5	0.9728
-20.0	0.68	203.6	224	1.003
-10.0	0.7079	210.5	231.7	1.033
0.0	0.7358	217.5	239.6	1.062
10.0	0.7635	224.7	247.6	1.091
20.0	0.7912	232.1	255.8	1.12
30.0	0.8188	239.7	264.2	1.148
40.0	0.8463	247.4	272.8	1.176
50.0	0.8738	255.3	281.5	1.203
60.0	0.9013	263.4	290.4	1.23
70.0	0.9287	271.6	299.5	1.257
80.0	0.9562	280	308.7	1.283
90.0	0.9835	288.6	318.1	1.31
110.0	1.038	306.2	337.3	1.361
120.0	1.066	315.2	347.2	1.387
130.0	1.093	324.5	357.2	1.412
140.0	1.12	333.8	367.4	1.437
150.0	1.147	343.4	377.8	1.462
160.0	1.175	353	388.3	1.486
170.0	1.202	362.9	398.9	1.511
180.0	1.229	372.9	409.7	1.535
190.0	1.257	383	420.7	1.559
200.0	1.284	393.3	431.8	1.582

R134a	$p =$	0.04	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.16	-30.13	-0.1281
-40.0	0.4651	190.1	208.7	0.917
-30.0	0.4867	196.6	216.1	0.9483
-20.0	0.5081	203.4	223.7	0.9788
-10.0	0.5292	210.3	231.4	1.009
0.0	0.5503	217.3	239.3	1.038
10.0	0.5712	224.6	247.4	1.067
20.0	0.5921	232	255.7	1.096
30.0	0.6129	239.5	264.1	1.124
40.0	0.6337	247.3	272.6	1.152
50.0	0.6544	255.2	281.4	1.179
60.0	0.6751	263.3	290.3	1.206
70.0	0.6957	271.5	299.3	1.233
80.0	0.7163	279.9	308.6	1.26
90.0	0.7369	288.5	318	1.286
110.0	0.7781	306.1	337.2	1.338
120.0	0.7986	315.2	347.1	1.363
130.0	0.8191	324.4	357.2	1.388
140.0	0.8396	333.8	367.4	1.413
150.0	0.8601	343.3	377.7	1.438
160.0	0.8806	353	388.2	1.463
170.0	0.9011	362.8	398.9	1.487
180.0	0.9216	372.8	409.7	1.511
190.0	0.942	383	420.7	1.535
200.0	0.9625	393.3	431.8	1.559

R134a	$p =$	0.05	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.16	-30.13	-0.1281
-40.0	0.3701	189.7	208.2	0.8974
-30.0	0.3876	196.4	215.8	0.929
-20.0	0.4049	203.2	223.4	0.9598
-10.0	0.422	210.1	231.2	0.9899
0.0	0.439	217.2	239.1	1.019
10.0	0.4559	224.4	247.2	1.049
20.0	0.4727	231.8	255.5	1.077
30.0	0.4894	239.4	263.9	1.105
40.0	0.5061	247.2	272.5	1.133
50.0	0.5227	255.1	281.2	1.161
60.0	0.5393	263.2	290.1	1.188
70.0	0.5559	271.4	299.2	1.215
80.0	0.5724	279.8	308.5	1.241
90.0	0.589	288.4	317.9	1.268
110.0	0.6219	306.1	337.2	1.319
120.0	0.6384	315.1	347	1.345
130.0	0.6549	324.3	357.1	1.37
140.0	0.6713	333.7	367.3	1.395
150.0	0.6877	343.3	377.6	1.42
160.0	0.7041	352.9	388.1	1.444
170.0	0.7205	362.8	398.8	1.469
180.0	0.7369	372.8	409.6	1.493
190.0	0.7533	382.9	420.6	1.517
200.0	0.7697	393.2	431.7	1.541

R134a	$p =$	0.06	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.17	-30.12	-0.1281
-40.0	0.00071	-17.71	-17.66	-0.07345
-30.0	0.3215	196.1	215.4	0.913
-20.0	0.3361	202.9	223.1	0.944
-10.0	0.3505	209.9	230.9	0.9743
0.0	0.3648	217	238.9	1.004
10.0	0.3789	224.3	247	1.033
20.0	0.393	231.7	255.3	1.062
30.0	0.4071	239.3	263.7	1.09
40.0	0.421	247	272.3	1.118
50.0	0.4349	255	281.1	1.146
60.0	0.4488	263.1	290	1.173
70.0	0.4627	271.3	299.1	1.2
80.0	0.4765	279.7	308.3	1.226
90.0	0.4903	288.3	317.8	1.253
110.0	0.5179	306	337.1	1.304
120.0	0.5316	315.1	347	1.33
130.0	0.5453	324.3	357	1.355
140.0	0.5591	333.7	367.2	1.38
150.0	0.5728	343.2	377.6	1.405
160.0	0.5865	352.9	388.1	1.429
170.0	0.6002	362.7	398.7	1.454
180.0	0.6139	372.7	409.6	1.478
190.0	0.6275	382.9	420.5	1.502
200.0	0.6412	393.2	431.7	1.526

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.08</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.17	-30.12	-0.1281
-40.0	0.00071	-17.71	-17.66	-0.07348
-30.0	0.2388	195.6	214.7	0.8873
-20.0	0.2501	202.5	222.5	0.9187
-10.0	0.2611	209.5	230.4	0.9493
0.0	0.272	216.6	238.4	0.9793
10.0	0.2828	223.9	246.6	1.009
20.0	0.2935	231.4	254.9	1.038
30.0	0.3041	239	263.4	1.066
40.0	0.3147	246.8	272	1.094
50.0	0.3252	254.8	280.8	1.122
60.0	0.3357	262.9	289.7	1.149
70.0	0.3462	271.1	298.8	1.176
80.0	0.3566	279.6	308.1	1.202
90.0	0.367	288.2	317.5	1.229
110.0	0.3878	305.9	336.9	1.281
120.0	0.3981	314.9	346.8	1.306
130.0	0.4085	324.2	356.8	1.331
140.0	0.4188	333.5	367.1	1.356
150.0	0.4291	343.1	377.4	1.381
160.0	0.4394	352.8	387.9	1.406
170.0	0.4497	362.6	398.6	1.43
180.0	0.46	372.6	409.4	1.454
190.0	0.4703	382.8	420.4	1.478
200.0	0.4806	393.1	431.5	1.502

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.1</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.18	-30.11	-0.1281
-40.0	0.00071	-17.72	-17.65	-0.07351
-30.0	0.00072	-5.085	-5.013	-0.02045
-20.0	0.1984	202	221.8	0.8986
-10.0	0.2074	209.1	229.8	0.9296
0.0	0.2163	216.3	237.9	0.9598
10.0	0.2251	223.6	246.1	0.9893
20.0	0.2337	231.1	254.5	1.018
30.0	0.2423	238.8	263	1.047
40.0	0.2509	246.6	271.7	1.075
50.0	0.2594	254.6	280.5	1.103
60.0	0.2678	262.7	289.5	1.13
70.0	0.2763	271	298.6	1.157
80.0	0.2847	279.4	307.9	1.184
90.0	0.293	288	317.3	1.21
110.0	0.3097	305.7	336.7	1.262
120.0	0.318	314.8	346.6	1.288
130.0	0.3263	324	356.7	1.313
140.0	0.3346	333.4	366.9	1.338
150.0	0.3429	343	377.3	1.363
160.0	0.3512	352.7	387.8	1.387
170.0	0.3594	362.5	398.5	1.412
180.0	0.3677	372.6	409.3	1.436
190.0	0.3759	382.7	420.3	1.46
200.0	0.3842	393	431.4	1.484

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.15</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.19	-30.09	-0.1282
-40.0	0.00071	-17.74	-17.63	-0.07358
-30.0	0.00072	-5.104	-4.996	-0.02052
-20.0	0.00074	7.721	7.831	0.03117
-10.0	0.1358	208	228.4	0.8925
0.0	0.142	215.4	236.7	0.9234
10.0	0.1481	222.8	245	0.9534
20.0	0.1541	230.4	253.5	0.9829
30.0	0.16	238.1	262.1	1.012
40.0	0.1658	246	270.9	1.04
50.0	0.1716	254	279.8	1.068
60.0	0.1773	262.2	288.8	1.096
70.0	0.183	270.5	298	1.123
80.0	0.1887	279	307.3	1.15
90.0	0.1944	287.6	316.8	1.176
110.0	0.2056	305.4	336.2	1.228
120.0	0.2112	314.5	346.2	1.254
130.0	0.2168	323.7	356.3	1.279
140.0	0.2224	333.2	366.5	1.304
150.0	0.228	342.7	376.9	1.329
160.0	0.2335	352.4	387.5	1.354
170.0	0.2391	362.3	398.2	1.378
180.0	0.2446	372.3	409	1.402
190.0	0.2501	382.5	420	1.426
200.0	0.2556	392.8	431.2	1.45

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.20</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00069	-30.21	-30.07	-0.1283
-40.0	0.00071	-17.75	-17.61	-0.07365
-30.0	0.00072	-5.122	-4.978	-0.0206
-20.0	0.00074	7.699	7.847	0.03108
-10.0	0.09991	206.9	226.9	0.8646
0.0	0.1048	214.4	235.4	0.8964
10.0	0.1096	222	243.9	0.927
20.0	0.1142	229.7	252.5	0.9569
30.0	0.1187	237.5	261.2	0.9861
40.0	0.1232	245.4	270.1	1.015
50.0	0.1277	253.5	279	1.043
60.0	0.1321	261.7	288.1	1.071
70.0	0.1364	270.1	297.4	1.098
80.0	0.1407	278.6	306.7	1.125
90.0	0.145	287.3	316.3	1.152
110.0	0.1536	305	335.8	1.204
120.0	0.1578	314.2	345.7	1.229
130.0	0.1621	323.4	355.9	1.255
140.0	0.1663	332.9	366.1	1.28
150.0	0.1705	342.5	376.6	1.305
160.0	0.1747	352.2	387.1	1.33
170.0	0.1789	362.1	397.8	1.354
180.0	0.183	372.1	408.7	1.378
190.0	0.1872	382.3	419.7	1.402
200.0	0.1914	392.6	430.9	1.426

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.30</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.24	-30.03	-0.1284
-40.00	0.00071	-17.79	-17.57	-0.0738
-30.00	0.00072	-5.16	-4.944	-0.02076
-20.00	0.00074	7.657	7.878	0.03092
-10.00	0.00075	20.69	20.91	0.08142
0.0	0.00077	33.96	34.19	0.1309
10.00	0.07093	220.2	241.5	0.8876
20.00	0.07425	228.2	250.4	0.9185
30.00	0.07748	236.1	259.4	0.9485
40.00	0.08063	244.2	268.4	0.9778
50.00	0.08372	252.4	277.5	1.006
60.00	0.08677	260.7	286.7	1.035
70.00	0.08978	269.1	296.1	1.062
80.00	0.09276	277.7	305.6	1.089
90.00	0.0957	286.5	315.2	1.116
110.0	0.1015	304.4	334.8	1.169
120.0	0.1044	313.5	344.9	1.195
130.0	0.1073	322.8	355	1.22
140.0	0.1102	332.3	365.4	1.246
150.0	0.113	341.9	375.8	1.271
160.0	0.1158	351.7	386.4	1.295
170.0	0.1187	361.6	397.2	1.32
180.0	0.1215	371.6	408.1	1.344
190.0	0.1243	381.8	419.1	1.368
200.0	0.1271	392.2	430.3	1.392

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.35</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.25	-30.01	-0.1285
-40.00	0.00071	-17.8	-17.56	-0.07387
-30.00	0.00072	-5.179	-4.927	-0.02083
-20.00	0.00074	7.636	7.894	0.03084
-10.00	0.00075	20.66	20.93	0.08133
0.0	0.00077	33.93	34.2	0.1308
10.00	0.05985	219.3	240.3	0.8716
20.00	0.06281	227.3	249.3	0.9031
30.00	0.06567	235.4	258.4	0.9336
40.00	0.06844	243.6	267.5	0.9631
50.00	0.07116	251.8	276.7	0.9921
60.00	0.07382	260.2	286	1.02
70.00	0.07645	268.7	295.4	1.048
80.00	0.07904	277.3	305	1.076
90.00	0.0816	286.1	314.6	1.103
110.0	0.08666	304	334.3	1.155
120.0	0.08916	313.2	344.4	1.181
130.0	0.09165	322.5	354.6	1.207
140.0	0.09412	332	365	1.232
150.0	0.09659	341.7	375.5	1.257
160.0	0.09904	351.4	386.1	1.282
170.0	0.1015	361.4	396.9	1.307
180.0	0.1039	371.4	407.8	1.331
190.0	0.1063	381.6	418.9	1.355
200.0	0.1088	392	430.1	1.379

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.40</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.27	-29.99	-0.1285
-40.00	0.0007	-17.82	-17.54	-0.07394
-30.00	0.00072	-5.197	-4.909	-0.02091
-20.00	0.00074	7.615	7.91	0.03075
-10.00	0.00075	20.64	20.94	0.08124
0.0	0.00077	33.91	34.21	0.1307
10.00	0.05151	218.3	238.9	0.8571
20.00	0.05421	226.5	248.2	0.8893
30.00	0.0568	234.7	257.4	0.9202
40.00	0.05929	242.9	266.6	0.9502
50.00	0.06172	251.2	275.9	0.9794
60.00	0.0641	259.7	285.3	1.008
70.00	0.06644	268.2	294.8	1.036
80.00	0.06875	276.9	304.4	1.063
90.00	0.07102	285.7	314.1	1.091
100.0	0.07327	294.6	323.9	1.117
110.0	0.07551	303.7	333.9	1.144
120.0	0.07772	312.9	344	1.17
130.0	0.07991	322.2	354.2	1.195
140.0	0.0821	331.7	364.6	1.221
150.0	0.08427	341.4	375.1	1.246
160.0	0.08643	351.2	385.7	1.271
170.0	0.08858	361.1	396.5	1.295
180.0	0.09072	371.2	407.5	1.32
190.0	0.09286	381.4	418.6	1.344
200.0	0.09499	391.8	429.8	1.368

<b>R134a</b>	<b>p =</b>	<b>0.50</b>	<b>[MPa]</b>	
<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.3	-29.95	-0.1287
-40.00	0.0007	-17.85	-17.5	-0.07408
-30.00	0.00072	-5.235	-4.875	-0.02106
-20.00	0.00074	7.573	7.941	0.03059
-10.00	0.00075	20.59	20.97	0.08106
0.0	0.00077	33.85	34.24	0.1305
10.00	0.00079	47.38	47.78	0.1792
20.00	0.04212	224.7	245.8	0.8649
30.00	0.04434	233.2	255.3	0.8969
40.00	0.04646	241.6	264.8	0.9276
50.00	0.0485	250.1	274.3	0.9574
60.00	0.05049	258.6	283.8	0.9865
70.00	0.05243	267.2	293.4	1.015
80.00	0.05433	276	303.1	1.043
90.00	0.05621	284.8	312.9	1.07
100.0	0.05805	293.8	322.9	1.097
110.0	0.05988	303	332.9	1.124
120.0	0.06169	312.2	343.1	1.15
130.0	0.06348	321.6	353.4	1.176
140.0	0.06526	331.2	363.8	1.201
150.0	0.06702	340.8	374.4	1.226
160.0	0.06878	350.7	385.1	1.251
170.0	0.07052	360.6	395.9	1.276
180.0	0.07226	370.7	406.9	1.301
190.0	0.07398	381	418	1.325
200.0	0.07571	391.4	429.2	1.349

R134a	$p =$	0.60	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.33	-29.91	-0.1288
-40.00	0.0007	-17.89	-17.46	-0.07423
-30.00	0.00072	-5.272	-4.84	-0.02122
-20.00	0.00074	7.532	7.973	0.03042
-10.00	0.00075	20.55	21	0.08088
0.0	0.00077	33.8	34.26	0.1303
10.00	0.00079	47.32	47.8	0.179
20.00	0.00082	61.17	61.66	0.2271
30.00	0.03598	231.6	253.2	0.8765
40.00	0.03787	240.2	262.9	0.9082
50.00	0.03966	248.8	272.6	0.9387
60.00	0.04139	257.5	282.3	0.9682
70.00	0.04307	266.2	292.1	0.9971
80.00	0.04471	275.1	301.9	1.025
90.00	0.04632	284	311.8	1.053
100.0	0.0479	293.1	321.8	1.08
110.0	0.04946	302.3	331.9	1.107
120.0	0.051	311.6	342.2	1.133
130.0	0.05252	321	352.5	1.159
140.0	0.05403	330.6	363	1.185
150.0	0.05552	340.3	373.6	1.21
160.0	0.05701	350.1	384.4	1.235
170.0	0.05848	360.1	395.2	1.26
180.0	0.05995	370.3	406.2	1.285
190.0	0.0614	380.5	417.4	1.309
200.0	0.06285	390.9	428.7	1.333

R134a	$p =$	0.80	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.39	-29.84	-0.1291
-40.00	0.0007	-17.95	-17.39	-0.07451
-30.00	0.00072	-5.346	-4.771	-0.02152
-20.00	0.00074	7.448	8.036	0.03009
-10.00	0.00075	20.45	21.05	0.08052
0.0	0.00077	33.69	34.31	0.1299
10.00	0.00079	47.2	47.83	0.1786
20.00	0.00082	61.02	61.68	0.2266
30.00	0.00084	75.24	75.91	0.2744
40.00	0.02704	237.2	258.8	0.8746
50.00	0.02855	246.2	269	0.9068
60.00	0.02997	255.2	279.1	0.9376
70.00	0.03134	264.1	289.2	0.9674
80.00	0.03266	273.2	299.3	0.9964
90.00	0.03394	282.3	309.4	1.025
100.0	0.03519	291.5	319.6	1.052
110.0	0.03642	300.8	329.9	1.08
120.0	0.03763	310.2	340.3	1.106
130.0	0.03881	319.7	350.8	1.133
140.0	0.03999	329.4	361.4	1.159
150.0	0.04114	339.2	372.1	1.184
160.0	0.04229	349.1	382.9	1.21
170.0	0.04343	359.1	393.9	1.235
180.0	0.04455	369.3	405	1.259
190.0	0.04567	379.6	416.2	1.284
200.0	0.04679	390.1	427.5	1.308

R134a	$p =$	1.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.45	-29.76	-0.1293
-40.00	0.0007	-18.02	-17.31	-0.0748
-30.00	0.00072	-5.42	-4.701	-0.02183
-20.00	0.00073	7.365	8.1	0.02976
-10.00	0.00075	20.36	21.11	0.08016
0.0	0.00077	33.58	34.35	0.1296
10.00	0.00079	47.07	47.87	0.1781
20.00	0.00081	60.88	61.69	0.2261
30.00	0.00084	75.06	75.91	0.2738
40.00	0.02041	233.6	254	0.8444
50.00	0.0218	243.3	265.1	0.8791
60.00	0.02307	252.7	275.7	0.9116
70.00	0.02426	261.9	286.2	0.9425
80.00	0.0254	271.2	296.6	0.9724
90.00	0.02649	280.5	307	1.001
100.0	0.02755	289.8	317.4	1.03
110.0	0.02858	299.3	327.9	1.057
120.0	0.02959	308.8	338.4	1.085
130.0	0.03058	318.4	349	1.111
140.0	0.03155	328.2	359.7	1.137
150.0	0.03251	338	370.6	1.163
160.0	0.03346	348	381.5	1.189
170.0	0.03439	358.1	392.5	1.214
180.0	0.03532	368.4	403.7	1.239
190.0	0.03623	378.7	415	1.264
200.0	0.03714	389.2	426.4	1.288

R134a	$p =$	1.50	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.6	-29.56	-0.13
-40.00	0.0007	-18.18	-17.13	-0.07551
-30.00	0.00072	-5.604	-4.527	-0.02259
-20.00	0.00073	7.159	8.26	0.02894
-10.00	0.00075	20.12	21.25	0.07927
0.0	0.00077	33.32	34.47	0.1286
10.00	0.00079	46.77	47.95	0.1771
20.00	0.00081	60.52	61.74	0.2249
30.00	0.00084	74.64	75.9	0.2724
40.00	0.00087	89.21	90.51	0.3198
50.00	0.00091	104.4	105.7	0.3677
60.00	0.01361	245.1	265.5	0.8543
70.00	0.01466	255.6	277.6	0.8899
80.00	0.01561	265.7	289.1	0.923
90.00	0.01648	275.6	300.3	0.9543
100.0	0.01731	285.4	311.4	0.9844
110.0	0.01809	295.3	322.4	1.014
120.0	0.01885	305.1	333.4	1.042
130.0	0.01958	315	344.4	1.07
140.0	0.02029	325	355.5	1.097
150.0	0.02099	335.1	366.6	1.123
160.0	0.02167	345.3	377.8	1.149
170.0	0.02234	355.6	389.1	1.175
180.0	0.023	365.9	400.4	1.201
190.0	0.02365	376.4	411.9	1.226
200.0	0.02429	387.1	423.5	1.25

R134a	$p =$	2.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.74	-29.37	-0.1307
-40.00	0.0007	-18.35	-16.94	-0.07622
-30.00	0.00072	-5.786	-4.351	-0.02334
-20.00	0.00073	6.955	8.421	0.02813
-10.00	0.00075	19.89	21.39	0.07839
0.0	0.00077	33.06	34.59	0.1276
10.00	0.00079	46.47	48.05	0.176
20.00	0.00081	60.17	61.8	0.2237
30.00	0.00084	74.23	75.9	0.271
40.00	0.00087	88.71	90.44	0.3182
50.00	0.0009	103.7	105.5	0.3657
60.00	0.00095	119.6	121.4	0.4141
70.00	0.00957	247.1	266.2	0.8396
80.00	0.01054	258.9	280	0.879
90.00	0.01136	269.8	292.6	0.9142
100.0	0.0121	280.4	304.6	0.947
110.0	0.01279	290.8	316.4	0.9781
120.0	0.01344	301.1	328	1.008
130.0	0.01405	311.4	339.5	1.037
140.0	0.01464	321.7	351	1.065
150.0	0.01521	332	362.4	1.092
160.0	0.01576	342.4	373.9	1.119
170.0	0.0163	352.9	385.5	1.146
180.0	0.01683	363.4	397.1	1.171
190.0	0.01735	374.1	408.8	1.197
200.0	0.01786	384.8	420.5	1.222

R134a	$p =$	2.50	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-30.89	-29.17	-0.1313
-40.00	0.0007	-18.51	-16.75	-0.07692
-30.00	0.00072	-5.967	-4.175	-0.02409
-20.00	0.00073	6.753	8.584	0.02733
-10.00	0.00075	19.67	21.54	0.07752
0.0	0.00077	32.8	34.72	0.1267
10.00	0.00079	46.17	48.14	0.1749
20.00	0.00081	59.83	61.86	0.2225
30.00	0.00083	73.82	75.91	0.2697
40.00	0.00086	88.22	90.38	0.3166
50.00	0.0009	103.1	105.4	0.3637
60.00	0.00094	118.8	121.1	0.4117
70.00	0.001	135.5	137.9	0.4615
80.00	0.00722	249.5	267.6	0.8314
90.00	0.00815	262.8	283.1	0.8749
100.0	0.0089	274.6	296.8	0.9121
110.0	0.00955	285.8	309.7	0.9461
120.0	0.01015	296.7	322.1	0.9781
130.0	0.0107	307.4	334.2	1.009
140.0	0.01123	318.1	346.2	1.038
150.0	0.01173	328.7	358.1	1.066
160.0	0.01221	339.4	369.9	1.094
170.0	0.01267	350.1	381.7	1.121
180.0	0.01313	360.8	393.6	1.147
190.0	0.01357	371.6	405.5	1.173
200.0	0.014	382.5	417.5	1.199

R134a	$p =$	3.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-31.04	-28.97	-0.132
-40.00	0.0007	-18.67	-16.56	-0.07762
-30.00	0.00072	-6.146	-3.997	-0.02484
-20.00	0.00073	6.552	8.748	0.02653
-10.00	0.00075	19.44	21.69	0.07665
0.0	0.00077	32.54	34.84	0.1257
10.00	0.00079	45.88	48.24	0.1739
20.00	0.00081	59.5	61.92	0.2214
30.00	0.00083	73.43	75.92	0.2683
40.00	0.00086	87.74	90.32	0.3151
50.00	0.00089	102.5	105.2	0.3619
60.00	0.00093	118	120.8	0.4093
70.00	0.00099	134.4	137.3	0.4583
80.00	0.00106	152.4	155.6	0.5108
90.00	0.00575	252.7	270	0.8292
100.0	0.00664	267.4	287.3	0.8762
110.0	0.00733	280	302	0.915
120.0	0.00792	291.8	315.5	0.9499
130.0	0.00845	303.1	328.5	0.9825
140.0	0.00894	314.2	341	1.013
150.0	0.0094	325.2	353.4	1.043
160.0	0.00983	336.2	365.7	1.072
170.0	0.01025	347.1	377.9	1.099
180.0	0.01065	358.1	390	1.127
190.0	0.01104	369.1	402.2	1.153
200.0	0.01142	380.1	414.4	1.179

R134a	$p =$	3.50	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00069	-31.18	-28.77	-0.1327
-40.00	0.0007	-18.83	-16.38	-0.07831
-30.00	0.00072	-6.324	-3.819	-0.02558
-20.00	0.00073	6.354	8.913	0.02573
-10.00	0.00075	19.22	21.84	0.0758
0.0	0.00077	32.29	34.97	0.1248
10.00	0.00078	45.6	48.34	0.1729
20.00	0.00081	59.17	61.99	0.2202
30.00	0.00083	73.04	75.95	0.267
40.00	0.00086	87.28	90.29	0.3136
50.00	0.00089	102	105.1	0.3601
60.00	0.00093	117.3	120.5	0.4071
70.00	0.00098	133.4	136.8	0.4553
80.00	0.00105	150.9	154.5	0.5062
90.00	0.00117	171.4	175.5	0.5647
100.0	0.00483	257.2	274.2	0.8334
110.0	0.00565	272.9	292.7	0.8823
120.0	0.00628	286.1	308	0.922
130.0	0.00681	298.3	322.1	0.9574
140.0	0.00728	310.1	335.5	0.9902
150.0	0.00772	321.5	348.5	1.021
160.0	0.00813	332.8	361.3	1.051
170.0	0.00851	344	373.8	1.08
180.0	0.00888	355.2	386.3	1.108
190.0	0.00924	366.4	398.8	1.135
200.0	0.00958	377.7	411.2	1.161

**R600a – Isobutano**

**Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della temperatura**

Temp.	Press.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna (V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
T [C]	p [MPa]	$v_f$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_f$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
-50	0.01651	0.00158	1.911	-82.8	285.1	-82.78	316.7	-0.3413	1.449
-45	0.02177	0.00159	1.477	-72.41	290.9	-72.37	323	-0.2953	1.438
-40	0.02832	0.0016	1.157	-61.91	296.7	-61.86	329.4	-0.2498	1.429
-35	0.03637	0.00162	0.9173	-51.3	302.5	-51.24	335.9	-0.2047	1.421
-30	0.04616	0.00163	0.7352	-40.58	308.5	-40.51	342.4	-0.1602	1.415
-25	0.05793	0.00164	0.5953	-29.75	314.5	-29.66	349	-0.1161	1.41
-20	0.07195	0.00166	0.4866	-18.81	320.5	-18.69	355.6	-0.07242	1.406
-15	0.08851	0.00167	0.4013	-7.741	326.7	-7.593	362.2	-0.02914	1.403
-10	0.1079	0.00169	0.3336	3.444	332.8	3.627	368.8	0.01378	1.402
-5	0.1304	0.00171	0.2794	14.75	339	14.98	375.5	0.05636	1.401
0	0.1564	0.00172	0.2357	26.19	345.3	26.46	382.2	0.09863	1.401
5	0.1862	0.00174	0.2001	37.76	351.6	38.08	388.9	0.1406	1.402
10	0.2201	0.00176	0.1709	49.46	358	49.85	395.6	0.1823	1.403
15	0.2585	0.00178	0.1467	61.3	364.4	61.76	402.3	0.2238	1.406
20	0.3018	0.0018	0.1266	73.29	370.8	73.83	409.1	0.265	1.409
25	0.3503	0.00182	0.1098	85.41	377.3	86.05	415.8	0.3061	1.412
30	0.4043	0.00184	0.09562	97.69	383.8	98.44	422.5	0.347	1.416
35	0.4644	0.00186	0.08359	110.1	390.3	111	429.2	0.3877	1.42
40	0.5308	0.00188	0.07334	122.7	396.9	123.7	435.8	0.4283	1.425
45	0.604	0.00191	0.06455	135.5	403.4	136.6	442.4	0.4688	1.43
50	0.6843	0.00193	0.05698	148.4	409.9	149.8	448.9	0.5092	1.435
55	0.7723	0.00196	0.05043	161.6	416.5	163.1	455.4	0.5495	1.44
60	0.8683	0.00199	0.04472	174.9	422.9	176.6	461.8	0.5899	1.446
65	0.9728	0.00202	0.03973	188.4	429.4	190.4	468	0.6303	1.451
70	1.086	0.00205	0.03535	202.1	435.8	204.4	474.2	0.6707	1.457
75	1.209	0.00209	0.03149	216.1	442	218.6	480.1	0.7112	1.462
80	1.342	0.00213	0.02807	230.3	448.2	233.2	485.9	0.7519	1.467
85	1.485	0.00217	0.02502	244.8	454.2	248	491.4	0.7927	1.472
90	1.639	0.00222	0.02229	259.6	460	263.2	496.6	0.8339	1.477
95	1.805	0.00227	0.01984	274.7	465.6	278.8	501.4	0.8755	1.48
100	1.984	0.00233	0.01762	290.2	470.8	294.8	505.7	0.9175	1.483
105	2.175	0.00239	0.01561	306.1	475.5	311.3	509.5	0.9603	1.484
110	2.381	0.00247	0.01376	322.6	479.7	328.4	512.4	1.004	1.484
115	2.601	0.00257	0.01205	339.7	483	346.4	514.3	1.049	1.482
120	2.837	0.00268	0.01044	357.9	485	365.5	514.7	1.096	1.476
125	3.091	0.00285	0.00888	377.6	485.1	386.4	512.6	1.147	1.464
130	3.364	0.00311	0.00725	400.6	481.1	411	505.5	1.207	1.441

**R600a – Isobutano**

**Proprietà del liquido e del vapore saturo in funzione della pressione**

Press.	Temp.	Vol. Spec. (L)	Vol. Spec. (V)	E.Interna (L)	E.Interna( V)	Entalpia (L)	Entalpia (V)	Entropia (L)	Entropia (V)
$p$ [MPa]	$T$ [C]	$v_l$ [m³/kg]	$v_g$ [m³/kg]	$u_l$ [kJ/kg]	$u_g$ [kJ/kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kg K]	$s_g$ [kJ/kg K]
0.01	-58.44	0.00156	3.046	-100.1	275.6	-100.1	306	-0.4204	1.471
0.02	-46.56	0.00159	1.599	-75.67	289.1	-75.64	321	-0.3096	1.441
0.03	-38.87	0.00161	1.097	-59.53	298	-59.48	330.9	-0.2396	1.427
0.04	-33.03	0.00162	0.8398	-47.1	304.9	-47.03	338.5	-0.1872	1.418
0.05	-28.27	0.00163	0.6826	-36.84	310.6	-36.76	344.7	-0.1449	1.413
0.06	-24.2	0.00165	0.5762	-28.02	315.4	-27.92	350	-0.1091	1.409
0.07	-20.65	0.00166	0.4992	-20.23	319.8	-20.11	354.7	-0.07805	1.406
0.08	-17.47	0.00167	0.4409	-13.22	323.6	-13.08	358.9	-0.05046	1.404
0.09	-14.59	0.00168	0.3951	-6.82	327.2	-6.669	362.7	-0.02557	1.403
0.1	-11.94	0.00168	0.3581	-0.92	330.4	-0.7517	366.2	-0.00287	1.402
0.2	7.111	0.00175	0.187	42.68	354.3	43.03	391.7	0.1583	1.402
0.3	19.8	0.00179	0.1273	72.81	370.6	73.35	408.8	0.2634	1.408
0.4	29.62	0.00184	0.09662	96.75	383.3	97.49	422	0.3438	1.416
0.5	37.74	0.00187	0.07777	117	393.9	118	432.8	0.41	1.423
0.6	44.74	0.00191	0.06498	134.8	403.1	136	442.1	0.4667	1.43
0.7	50.92	0.00194	0.0557	150.9	411.1	152.2	450.1	0.5166	1.436
0.8	56.49	0.00197	0.04865	165.5	418.4	167.1	457.3	0.5616	1.442
0.9	61.56	0.002	0.04309	179.1	425	180.9	463.7	0.6025	1.448
1	66.24	0.00203	0.0386	191.8	431	193.8	469.6	0.6403	1.453
1.2	74.65	0.00209	0.03175	215.1	441.6	217.6	479.7	0.7083	1.462
1.4	82.08	0.00215	0.02676	236.3	450.7	239.3	488.2	0.7688	1.469
1.6	88.76	0.00221	0.02294	255.9	458.6	259.4	495.3	0.8236	1.476
1.8	94.84	0.00227	0.01991	274.2	465.4	278.3	501.2	0.8741	1.48
2	100.4	0.00233	0.01744	291.5	471.2	296.2	506.1	0.9212	1.483
2.2	105.6	0.0024	0.01537	308.1	476.1	313.4	509.9	0.9656	1.484
2.4	110.4	0.00248	0.0136	324.1	480	330	512.6	1.008	1.484
2.6	115	0.00257	0.01205	339.6	482.9	346.3	514.3	1.049	1.482
2.8	119.2	0.00266	0.01068	355	484.8	362.5	514.7	1.089	1.477
3	123.2	0.00278	0.00942	370.4	485.4	378.8	513.7	1.129	1.469
3.2	127	0.00293	0.00823	386.4	484.2	395.8	510.6	1.17	1.457
3.4	130.6	0.00316	0.00703	404	480	414.8	503.9	1.216	1.437
3.6	134	0.00372	0.00543	430	465.8	443.4	485.4	1.285	1.388

**R600a – Isobutano: Liquido compresso e vapore surriscaldato.**

R600a	$p =$	0.02	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.81	-82.77	-0.3414
-40.0	1.647	297.1	330.1	1.48
-30.0	1.721	309.8	344.2	1.54
-20.0	1.794	322.8	358.7	1.598
-10.0	1.867	336.3	373.6	1.656
0.0	1.94	350.2	389	1.713
10.0	2.013	364.5	404.8	1.77
20.0	2.086	379.3	421	1.826
30.0	2.158	394.6	437.7	1.882
40.0	2.23	410.3	454.9	1.938
50.0	2.302	426.4	472.5	1.993
60.0	2.375	443.1	490.6	2.049
70.0	2.447	460.2	509.1	2.103
80.0	2.519	477.8	528.2	2.158
90.0	2.591	495.8	547.7	2.212
100.0	2.662	514.4	567.6	2.267
110.0	2.734	533.3	588	2.321
120.0	2.806	552.8	608.9	2.374
130.0	2.878	572.7	630.3	2.428
140.0	2.95	593.1	652	2.481
150.0	3.022	613.9	674.3	2.535
160.0	3.093	635.1	697	2.588
170.0	3.165	656.8	720.1	2.64
180.0	3.237	678.9	743.6	2.693
190.0	3.309	701.4	767.6	2.745
200.0	3.38	724.4	792	2.797

R600a	$p =$	0.03	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.81	-82.76	-0.3414
-40.0	0.0016	-61.91	-61.86	-0.2498
-30.0	1.141	309.3	343.5	1.48
-20.0	1.191	322.4	358.1	1.538
-10.0	1.24	335.9	373.1	1.596
0.0	1.289	349.8	388.5	1.654
10.0	1.338	364.2	404.3	1.711
20.0	1.387	379	420.6	1.767
30.0	1.435	394.3	437.4	1.824
40.0	1.484	410	454.5	1.879
50.0	1.532	426.2	472.2	1.935
60.0	1.58	442.9	490.3	1.99
70.0	1.628	460	508.9	2.045
80.0	1.677	477.6	527.9	2.1
90.0	1.725	495.7	547.4	2.154
100.0	1.773	514.2	567.4	2.208
110.0	1.821	533.2	587.8	2.262
120.0	1.869	552.7	608.7	2.316
130.0	1.917	572.6	630.1	2.37
140.0	1.965	592.9	651.9	2.423
150.0	2.013	613.7	674.1	2.476
160.0	2.061	635	696.8	2.529
170.0	2.109	656.7	719.9	2.582
180.0	2.156	678.8	743.5	2.635
190.0	2.204	701.3	767.5	2.687
200.0	2.252	724.3	791.9	2.739

R600a	$p =$	0.04	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.82	-82.75	-0.3414
-40.0	0.0016	-61.92	-61.85	-0.2498
-30.0	0.8513	308.8	342.8	1.436
-20.0	0.8889	322	357.5	1.496
-10.0	0.9263	335.5	372.6	1.554
0.0	0.9634	349.5	388	1.612
10.0	1	363.9	403.9	1.669
20.0	1.037	378.8	420.2	1.725
30.0	1.074	394.1	437	1.782
40.0	1.11	409.8	454.2	1.837
50.0	1.147	426	471.9	1.893
60.0	1.183	442.7	490	1.948
70.0	1.219	459.9	508.6	2.003
80.0	1.256	477.5	527.7	2.058
90.0	1.292	495.5	547.2	2.112
100.0	1.328	514.1	567.2	2.167
110.0	1.364	533.1	587.7	2.221
120.0	1.4	552.5	608.6	2.275
130.0	1.436	572.5	629.9	2.328
140.0	1.472	592.8	651.7	2.382
150.0	1.508	613.6	674	2.435
160.0	1.544	634.9	696.7	2.488
170.0	1.58	656.6	719.8	2.541
180.0	1.616	678.7	743.4	2.593
190.0	1.652	701.2	767.3	2.646
200.0	1.688	724.2	791.7	2.698

R600a	$p =$	0.05	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.82	-82.74	-0.3414
-40.0	0.0016	-61.92	-61.84	-0.2498
-30.0	0.00163	-40.59	-40.5	-0.1602
-20.0	0.7078	321.5	356.9	1.462
-10.0	0.738	335.1	372	1.52
0.0	0.768	349.2	387.6	1.578
10.0	0.7978	363.6	403.5	1.636
20.0	0.8274	378.5	419.9	1.692
30.0	0.8569	393.8	436.7	1.749
40.0	0.8863	409.6	453.9	1.805
50.0	0.9156	425.8	471.6	1.86
60.0	0.9448	442.5	489.8	1.916
70.0	0.9739	459.7	508.4	1.971
80.0	1.003	477.3	527.5	2.026
90.0	1.032	495.4	547	2.08
100.0	1.061	513.9	567	2.134
110.0	1.09	533	587.5	2.189
120.0	1.119	552.4	608.4	2.242
130.0	1.148	572.3	629.7	2.296
140.0	1.177	592.7	651.6	2.35
150.0	1.206	613.5	673.8	2.403
160.0	1.235	634.8	696.5	2.456
170.0	1.263	656.5	719.7	2.509
180.0	1.292	678.6	743.2	2.561
190.0	1.321	701.2	767.2	2.614
200.0	1.35	724.1	791.6	2.666

R600a	$p =$	0.06	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.83	-82.73	-0.3415
-40.0	0.0016	-61.93	-61.83	-0.2498
-30.0	0.00163	-40.59	-40.49	-0.1602
-20.0	0.587	321.1	356.3	1.434
-10.0	0.6125	334.7	371.5	1.493
0.0	0.6377	348.8	387.1	1.551
10.0	0.6627	363.3	403.1	1.608
20.0	0.6876	378.2	419.5	1.665
30.0	0.7123	393.6	436.3	1.722
40.0	0.7369	409.4	453.6	1.778
50.0	0.7615	425.6	471.3	1.834
60.0	0.7859	442.3	489.5	1.889
70.0	0.8103	459.5	508.1	1.944
80.0	0.8346	477.1	527.2	1.999
90.0	0.8589	495.2	546.8	2.054
100.0	0.8832	513.8	566.8	2.108
110.0	0.9074	532.8	587.3	2.162
120.0	0.9315	552.3	608.2	2.216
130.0	0.9557	572.2	629.6	2.27
140.0	0.9798	592.6	651.4	2.323
150.0	1.004	613.4	673.7	2.377
160.0	1.028	634.7	696.4	2.43
170.0	1.052	656.4	719.5	2.482
180.0	1.076	678.5	743.1	2.535
190.0	1.1	701.1	767.1	2.587
200.0	1.124	724	791.5	2.639

R600a	$p =$	0.08	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.84	-82.71	-0.3415
-40.0	0.0016	-61.94	-61.81	-0.2499
-30.0	0.00163	-40.61	-40.48	-0.1603
-20.0	0.00166	-18.81	-18.68	-0.07245
-10.0	0.4555	334	370.4	1.449
0.0	0.4748	348.1	386.1	1.507
10.0	0.4939	362.7	402.2	1.565
20.0	0.5128	377.6	418.7	1.622
30.0	0.5316	393.1	435.6	1.679
40.0	0.5502	408.9	452.9	1.735
50.0	0.5688	425.2	470.7	1.791
60.0	0.5873	441.9	488.9	1.847
70.0	0.6058	459.1	507.6	1.902
80.0	0.6241	476.8	526.7	1.957
90.0	0.6425	494.9	546.3	2.012
100.0	0.6607	513.5	566.4	2.066
110.0	0.679	532.6	586.9	2.12
120.0	0.6972	552	607.8	2.174
130.0	0.7154	572	629.2	2.228
140.0	0.7335	592.4	651.1	2.282
150.0	0.7517	613.2	673.4	2.335
160.0	0.7698	634.5	696.1	2.388
170.0	0.7879	656.2	719.2	2.441
180.0	0.806	678.3	742.8	2.493
190.0	0.8241	700.9	766.8	2.546
200.0	0.8421	723.9	791.2	2.598

R600a	$p =$	0.1	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.85	-82.69	-0.3416
-40.0	0.0016	-61.95	-61.79	-0.2499
-30.0	0.00163	-40.62	-40.46	-0.1603
-20.0	0.00166	-18.83	-18.66	-0.07251
-10.0	0.3612	333.1	369.3	1.414
0.0	0.377	347.4	385.1	1.473
10.0	0.3925	362	401.3	1.531
20.0	0.4079	377.1	417.9	1.588
30.0	0.4231	392.5	434.9	1.645
40.0	0.4382	408.4	452.3	1.702
50.0	0.4532	424.8	470.1	1.758
60.0	0.4681	441.6	488.4	1.814
70.0	0.483	458.8	507.1	1.869
80.0	0.4978	476.5	526.3	1.924
90.0	0.5126	494.6	545.9	1.979
100.0	0.5273	513.2	566	2.033
110.0	0.5419	532.3	586.5	2.088
120.0	0.5566	551.8	607.5	2.142
130.0	0.5712	571.8	628.9	2.196
140.0	0.5858	592.2	650.7	2.249
150.0	0.6004	613	673	2.302
160.0	0.6149	634.3	695.8	2.356
170.0	0.6294	656	719	2.408
180.0	0.6439	678.2	742.6	2.461
190.0	0.6584	700.7	766.6	2.514
200.0	0.6729	723.7	791	2.566

R600a	$p =$	0.15	[MPa]	
T	v	u	h	s
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.0	0.00158	-82.88	-82.64	-0.3417
-40.0	0.0016	-61.98	-61.74	-0.2501
-30.0	0.00163	-40.65	-40.41	-0.1605
-20.0	0.00166	-18.86	-18.62	-0.07266
-10.0	0.00169	3.409	3.662	0.01365
0.0	0.2464	345.6	382.5	1.408
10.0	0.2572	360.4	399	1.467
20.0	0.2679	375.6	415.8	1.525
30.0	0.2784	391.2	433	1.583
40.0	0.2888	407.3	450.6	1.64
50.0	0.299	423.7	468.6	1.697
60.0	0.3092	440.6	487	1.753
70.0	0.3193	457.9	505.8	1.808
80.0	0.3294	475.6	525.1	1.864
90.0	0.3394	493.9	544.8	1.919
100.0	0.3493	512.5	564.9	1.973
110.0	0.3592	531.6	585.5	2.028
120.0	0.3691	551.2	606.5	2.082
130.0	0.3789	571.2	628	2.136
140.0	0.3888	591.6	649.9	2.19
150.0	0.3986	612.5	672.3	2.243
160.0	0.4083	633.8	695	2.296
170.0	0.4181	655.5	718.3	2.349
180.0	0.4279	677.7	741.9	2.402
190.0	0.4376	700.3	765.9	2.455
200.0	0.4473	723.3	790.4	2.507

R600a	$p =$	0.20	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00158	-82.91	-82.59	-0.3418
-40.00	0.0016	-62.02	-61.69	-0.2502
-30.00	0.00163	-40.69	-40.36	-0.1606
-20.00	0.00166	-18.9	-18.57	-0.07281
-10.00	0.00169	3.367	3.705	0.01349
0.0	0.00172	26.15	26.5	0.09848
10.00	0.1895	358.7	396.6	1.42
20.00	0.1978	374.1	413.7	1.479
30.00	0.206	389.9	431.1	1.537
40.00	0.214	406	448.8	1.595
50.00	0.2219	422.6	467	1.652
60.00	0.2297	439.6	485.5	1.708
70.00	0.2374	457	504.5	1.765
80.00	0.2451	474.8	523.8	1.82
90.00	0.2527	493.1	543.6	1.875
100.0	0.2603	511.8	563.8	1.93
110.0	0.2678	530.9	584.5	1.985
120.0	0.2753	550.5	605.6	2.039
130.0	0.2828	570.6	627.1	2.093
140.0	0.2902	591	649.1	2.147
150.0	0.2977	611.9	671.5	2.201
160.0	0.3051	633.3	694.3	2.254
170.0	0.3124	655	717.5	2.307
180.0	0.3198	677.2	741.2	2.36
190.0	0.3272	699.8	765.3	2.412
200.0	0.3345	722.9	789.8	2.465

R600a	$p =$	0.30	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00158	-82.96	-82.49	-0.3421
-40.00	0.0016	-62.08	-61.6	-0.2505
-30.00	0.00163	-40.76	-40.27	-0.1609
-20.00	0.00166	-18.98	-18.48	-0.07311
-10.00	0.00169	3.284	3.79	0.01317
0.0	0.00172	26.06	26.57	0.09814
10.00	0.00176	49.38	49.91	0.182
20.00	0.1275	370.9	409.1	1.41
30.00	0.1333	387	427	1.47
40.00	0.139	403.5	445.2	1.529
50.00	0.1446	420.3	463.7	1.587
60.00	0.1501	437.5	482.5	1.644
70.00	0.1555	455.1	501.7	1.701
80.00	0.1608	473	521.3	1.757
90.00	0.166	491.5	541.3	1.813
100.0	0.1713	510.3	561.7	1.868
110.0	0.1764	529.5	582.5	1.923
120.0	0.1815	549.2	603.7	1.978
130.0	0.1866	569.3	625.3	2.032
140.0	0.1917	589.9	647.4	2.086
150.0	0.1967	610.9	669.9	2.14
160.0	0.2018	632.2	692.8	2.194
170.0	0.2068	654.1	716.1	2.247
180.0	0.2118	676.3	739.8	2.3
190.0	0.2167	698.9	764	2.353
200.0	0.2217	722	788.5	2.405

R600a	$p =$	0.40	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00158	-83.02	-82.39	-0.3423
-40.00	0.0016	-62.14	-61.5	-0.2507
-30.00	0.00163	-40.82	-40.17	-0.1612
-20.00	0.00166	-19.05	-18.39	-0.0734
-10.00	0.00169	3.2	3.875	0.01285
0.0	0.00172	25.96	26.65	0.0978
10.00	0.00176	49.27	49.98	0.1817
20.00	0.0018	73.17	73.89	0.2646
30.00	0.0968	384	422.7	1.418
40.00	0.1014	400.8	441.3	1.478
50.00	0.1058	417.9	460.2	1.538
60.00	0.1102	435.3	479.4	1.596
70.00	0.1144	453.1	498.8	1.654
80.00	0.1186	471.2	518.6	1.711
90.00	0.1227	489.8	538.8	1.767
100.0	0.1267	508.7	559.4	1.823
110.0	0.1307	528.1	580.4	1.878
120.0	0.1346	547.9	601.7	1.933
130.0	0.1385	568.1	623.5	1.988
140.0	0.1424	588.7	645.7	2.042
150.0	0.1463	609.7	668.2	2.096
160.0	0.1501	631.2	691.2	2.15
170.0	0.1539	653.1	714.6	2.203
180.0	0.1577	675.3	738.4	2.257
190.0	0.1615	698	762.6	2.309
200.0	0.1653	721.1	787.2	2.362

R600a	$p =$	0.60	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00158	-83.13	-82.19	-0.3428
-40.00	0.0016	-62.26	-61.3	-0.2513
-30.00	0.00163	-40.96	-39.98	-0.1617
-20.00	0.00166	-19.2	-18.21	-0.074
-10.00	0.00169	3.034	4.046	0.01222
0.0	0.00172	25.78	26.81	0.09712
10.00	0.00176	49.07	50.12	0.1809
20.00	0.00179	72.94	74.01	0.2638
30.00	0.00184	97.43	98.54	0.3461
40.00	0.00188	122.6	123.8	0.4279
50.00	0.06676	412.5	452.5	1.462
60.00	0.07002	430.5	472.5	1.523
70.00	0.07315	448.8	492.7	1.583
80.00	0.07618	467.3	513	1.641
90.00	0.07913	486.2	533.7	1.699
100.0	0.08202	505.5	554.7	1.756
110.0	0.08484	525.1	576	1.812
120.0	0.08762	545.1	597.7	1.868
130.0	0.09036	565.5	619.7	1.923
140.0	0.09307	586.3	642.1	1.978
150.0	0.09575	607.4	664.9	2.033
160.0	0.09841	629	688.1	2.087
170.0	0.101	651	711.6	2.141
180.0	0.1037	673.4	735.6	2.194
190.0	0.1063	696.2	759.9	2.247
200.0	0.1088	719.4	784.7	2.3

R600a	$p =$	0.80	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-83.24	-81.98	-0.3433
-40.00	0.0016	-62.39	-61.11	-0.2518
-30.00	0.00163	-41.1	-39.79	-0.1623
-20.00	0.00166	-19.35	-18.03	-0.07459
-10.00	0.00169	2.868	4.218	0.01159
0.0	0.00172	25.6	26.97	0.09644
10.00	0.00175	48.86	50.26	0.1802
20.00	0.00179	72.7	74.14	0.263
30.00	0.00183	97.17	98.64	0.3452
40.00	0.00188	122.3	123.8	0.427
50.00	0.00193	148.2	149.8	0.5085
60.00	0.04962	425	464.7	1.464
70.00	0.05229	444	485.8	1.527
80.00	0.05481	463	506.9	1.587
90.00	0.05723	482.4	528.1	1.647
100.0	0.05957	502	549.6	1.705
110.0	0.06184	521.9	571.3	1.762
120.0	0.06405	542.1	593.4	1.819
130.0	0.06622	562.7	615.7	1.875
140.0	0.06836	583.7	638.4	1.931
150.0	0.07046	605	661.4	1.986
160.0	0.07253	626.8	684.8	2.04
170.0	0.07458	648.9	708.5	2.095
180.0	0.0766	671.4	732.7	2.149
190.0	0.07861	694.3	757.2	2.202
200.0	0.08061	717.5	782	2.255

R600a	$p =$	1.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-83.36	-81.78	-0.3438
-40.00	0.0016	-62.51	-60.91	-0.2523
-30.00	0.00163	-41.23	-39.6	-0.1629
-20.00	0.00166	-19.5	-17.85	-0.07518
-10.00	0.00169	2.703	4.389	0.01096
0.0	0.00172	25.41	27.13	0.09577
10.00	0.00175	48.66	50.41	0.1795
20.00	0.00179	72.47	74.26	0.2623
30.00	0.00183	96.91	98.74	0.3443
40.00	0.00188	122	123.9	0.426
50.00	0.00193	147.9	149.8	0.5074
60.00	0.00199	174.6	176.6	0.5891
70.00	0.03951	438.4	477.9	1.477
80.00	0.0418	458.2	500	1.541
90.00	0.04395	478.1	522.1	1.602
100.0	0.04599	498.1	544.1	1.662
110.0	0.04795	518.4	566.4	1.721
120.0	0.04985	539	588.8	1.779
130.0	0.05169	559.8	611.5	1.836
140.0	0.05348	581	634.5	1.892
150.0	0.05524	602.5	657.8	1.948
160.0	0.05697	624.4	681.4	2.003
170.0	0.05868	646.7	705.3	2.058
180.0	0.06036	669.3	729.7	2.112
190.0	0.06202	692.3	754.3	2.166
200.0	0.06366	715.7	779.3	2.219

R600a	$p =$	1.50	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-83.63	-81.27	-0.3451
-40.00	0.0016	-62.81	-60.42	-0.2536
-30.00	0.00163	-41.57	-39.13	-0.1643
-20.00	0.00165	-19.87	-17.39	-0.07665
-10.00	0.00168	2.295	4.821	0.0094
0.0	0.00172	24.96	27.53	0.0941
10.00	0.00175	48.15	50.77	0.1777
20.00	0.00179	71.9	74.58	0.2603
30.00	0.00183	96.26	99.01	0.3422
40.00	0.00187	121.3	124.1	0.4236
50.00	0.00192	147	149.9	0.5048
60.00	0.00198	173.6	176.6	0.586
70.00	0.00205	201.1	204.2	0.6677
80.00	0.00212	229.8	233	0.7505
90.00	0.02564	464.8	503.3	1.504
100.0	0.02747	486.7	527.9	1.571
110.0	0.02913	508.4	552	1.635
120.0	0.03067	530	576	1.697
130.0	0.03213	551.7	599.9	1.757
140.0	0.03352	573.6	623.8	1.815
150.0	0.03486	595.7	648	1.873
160.0	0.03615	618.1	672.3	1.93
170.0	0.03741	640.7	696.9	1.986
180.0	0.03864	663.7	721.7	2.041
190.0	0.03985	687.1	746.8	2.096
200.0	0.04103	710.7	772.3	2.151

R600a	$p =$	2.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-83.91	-80.77	-0.3463
-40.00	0.0016	-63.12	-59.92	-0.255
-30.00	0.00162	-41.9	-38.65	-0.1656
-20.00	0.00165	-20.24	-16.93	-0.07811
-10.00	0.00168	1.89	5.254	0.00785
0.0	0.00171	24.51	27.94	0.09244
10.00	0.00175	47.65	51.15	0.1759
20.00	0.00178	71.34	74.91	0.2584
30.00	0.00183	95.63	99.28	0.3401
40.00	0.00187	120.6	124.3	0.4213
50.00	0.00192	146.2	150	0.5022
60.00	0.00197	172.6	176.6	0.583
70.00	0.00204	199.9	204	0.6642
80.00	0.00211	228.4	232.6	0.7462
90.00	0.0022	258.2	262.6	0.83
100.0	0.00233	290.1	294.7	0.9173
110.0	0.01919	495	533.4	1.555
120.0	0.02073	518.7	560.2	1.624
130.0	0.0221	541.9	586.1	1.689
140.0	0.02335	564.8	611.6	1.752
150.0	0.02453	587.8	636.9	1.812
160.0	0.02564	610.9	662.2	1.871
170.0	0.0267	634.2	687.6	1.929
180.0	0.02773	657.6	713.1	1.986
190.0	0.02872	681.4	738.8	2.042
200.0	0.02968	705.4	764.8	2.098

R600a	$p =$	2.50	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-84.18	-80.26	-0.3476
-40.00	0.0016	-63.42	-59.43	-0.2563
-30.00	0.00162	-42.23	-38.17	-0.167
-20.00	0.00165	-20.6	-16.47	-0.07955
-10.00	0.00168	1.49	5.691	0.00631
0.0	0.00171	24.07	28.35	0.0908
10.00	0.00175	47.16	51.52	0.1741
20.00	0.00178	70.79	75.25	0.2565
30.00	0.00182	95.01	99.56	0.338
40.00	0.00186	119.8	124.5	0.419
50.00	0.00191	145.4	150.2	0.4996
60.00	0.00197	171.7	176.6	0.5801
70.00	0.00203	198.8	203.9	0.6608
80.00	0.0021	227	232.2	0.7422
90.00	0.00219	256.4	261.9	0.825
100.0	0.0023	287.6	293.3	0.9104
110.0	0.00246	321.6	327.8	1.002
120.0	0.01424	502.9	538.5	1.547
130.0	0.01577	529.3	568.7	1.623
140.0	0.01705	554.3	596.9	1.692
150.0	0.01819	578.6	624.1	1.757
160.0	0.01923	602.7	650.8	1.82
170.0	0.02021	626.8	677.3	1.88
180.0	0.02113	650.9	703.7	1.939
190.0	0.02201	675.2	730.2	1.997
200.0	0.02285	699.6	756.8	2.053

R600a	$p =$	3.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-84.46	-79.75	-0.3488
-40.00	0.00159	-63.71	-58.93	-0.2575
-30.00	0.00162	-42.55	-37.69	-0.1684
-20.00	0.00165	-20.96	-16.01	-0.08099
-10.00	0.00168	1.095	6.13	0.00479
0.0	0.00171	23.63	28.76	0.08918
10.00	0.00174	46.67	51.9	0.1724
20.00	0.00178	70.25	75.58	0.2546
30.00	0.00182	94.4	99.85	0.336
40.00	0.00186	119.2	124.7	0.4167
50.00	0.00191	144.6	150.3	0.4971
60.00	0.00196	170.7	176.6	0.5773
70.00	0.00202	197.7	203.8	0.6576
80.00	0.00209	225.6	231.9	0.7384
90.00	0.00217	254.7	261.2	0.8203
100.0	0.00227	285.3	292.1	0.9042
110.0	0.00241	318.2	325.4	0.9922
120.0	0.00265	355.7	363.6	1.091
130.0	0.01103	510.8	543.9	1.545
140.0	0.01259	540.5	578.3	1.629
150.0	0.01382	567.4	608.9	1.702
160.0	0.01487	593.2	637.8	1.77
170.0	0.01581	618.4	665.8	1.834
180.0	0.01669	643.4	693.5	1.896
190.0	0.01751	668.4	720.9	1.955
200.0	0.01828	693.4	748.2	2.014

R600a	$p =$	3.50	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-84.73	-79.24	-0.35
-40.00	0.00159	-64.01	-58.43	-0.2588
-30.00	0.00162	-42.88	-37.21	-0.1697
-20.00	0.00165	-21.31	-15.55	-0.08241
-10.00	0.00168	0.7036	6.571	0.00328
0.0	0.00171	23.2	29.17	0.08757
10.00	0.00174	46.19	52.28	0.1707
20.00	0.00178	69.71	75.93	0.2527
30.00	0.00181	93.8	100.1	0.334
40.00	0.00186	118.5	125	0.4145
50.00	0.0019	143.8	150.5	0.4947
60.00	0.00195	169.8	176.7	0.5745
70.00	0.00201	196.7	203.7	0.6544
80.00	0.00208	224.4	231.7	0.7347
90.00	0.00216	253.2	260.7	0.8158
100.0	0.00225	283.3	291.2	0.8986
110.0	0.00238	315.3	323.6	0.9843
120.0	0.00256	350.4	359.4	1.076
130.0	0.00298	394.9	405.3	1.192
140.0	0.00893	519.9	551.1	1.551
150.0	0.01048	553	589.7	1.643
160.0	0.01164	581.7	622.4	1.719
170.0	0.01261	608.7	652.9	1.789
180.0	0.01348	635	682.1	1.854
190.0	0.01427	660.9	710.8	1.917
200.0	0.015	686.6	739.1	1.977

R600a	$p =$	4.00	[MPa]	
$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
[C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
-50.00	0.00157	-84.99	-78.72	-0.3512
-40.00	0.00159	-64.3	-57.93	-0.2601
-30.00	0.00162	-43.2	-36.73	-0.171
-20.00	0.00165	-21.67	-15.08	-0.08383
-10.00	0.00167	0.3164	7.015	0.00178
0.0	0.00171	22.77	29.59	0.08598
10.00	0.00174	45.72	52.67	0.169
20.00	0.00177	69.19	76.28	0.2509
30.00	0.00181	93.21	100.5	0.332
40.00	0.00185	117.8	125.2	0.4124
50.00	0.0019	143.1	150.6	0.4923
60.00	0.00195	169	176.8	0.5719
70.00	0.002	195.7	203.7	0.6514
80.00	0.00207	223.2	231.4	0.7312
90.00	0.00214	251.7	260.3	0.8117
100.0	0.00223	281.4	290.3	0.8934
110.0	0.00235	312.7	322.1	0.9773
120.0	0.00251	346.4	356.4	1.066
130.0	0.00277	384.8	395.9	1.165
140.0	0.00409	453.4	469.7	1.345
150.0	0.00764	531.9	562.5	1.568
160.0	0.00908	567.2	603.6	1.664
170.0	0.01014	597.3	637.9	1.742
180.0	0.01103	625.4	669.6	1.813
190.0	0.01182	652.6	699.9	1.879
200.0	0.01253	679.3	729.4	1.942

## Valori di $c_p$ , $c_v$ e $k$ per vari gas ideali in funzione di $T$

Temp	Aria			Azoto			Ossigeno			Temp
K	$c_p$	$c_v$	$k$	$c_p$	$c_v$	$k$	$c_p$	$c_v$	$k$	K
250	1.003	0.716	1.401	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	1.005	0.718	1.400	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	1.008	0.721	1.398	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	1.013	0.726	1.395	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	1.020	0.733	1.391	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	1.029	0.742	1.387	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	1.040	0.753	1.381	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	1.063	0.776	1.370	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	1.075	0.788	1.364	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	1.087	0.800	1.359	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	1.099	0.812	1.354	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	1.121	0.834	1.344	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000

Temp	Anidride Carbonica			Monoss. di Carbonio			Idrogeno			Temp
K	$c_p$	$c_v$	$k$	$c_p$	$c_v$	$k$	$c_p$	$c_v$	$k$	K
250	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400	14.051	9.927	1.416	250
300	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399	14.307	10.183	1.405	300
350	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398	14.427	10.302	1.400	350
400	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395	14.476	10.352	1.398	400
450	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392	14.501	10.377	1.398	450
500	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387	14.513	10.389	1.397	500
550	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382	14.530	10.405	1.396	550
600	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376	14.546	10.422	1.396	600
650	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370	14.571	10.447	1.395	650
700	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364	14.604	10.480	1.394	700
750	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358	14.645	10.521	1.392	750
800	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353	14.695	10.570	1.390	800
900	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343	14.822	10.698	1.385	900
1000	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335	14.983	10.859	1.380	1000

### Valori del calore specifico $c$ per liquidi

Liquido	Stato	$c$ (kJ/kgK)
Ammoniaca	sat. liq., -20°C	4.52
	sat. liq., 10°C	4.67
	sat. liq., 50°C	5.10
Alcool etilico	1 atm, 25°C	2.43
Glicerina	1 atm, 10°C	2.32
	1 atm, 50°C	2.58
Mercurio	1 atm, 10°C	0.138
	1 atm, 315°C	0.134
Refrigerante 12	sat. liq., -20°C	0.90
	sat. liq., 20°C	0.96
Acqua	1 atm, 0°C	4.217
	1 atm, 27°C	4.179
	1 atm, 100°C	4.218

### Valori del calore specifico $c$ per solidi

Solido	$T$ (K)	$c$ (kJ/kg K)
Alluminio	300	0.903
Argento	300	0.235
Ferro	300	0.447
Ghiaccio	200	1.56
	240	1.86
	273	2.11
Piombo	300	0.129
Rame	300	0.385
	400	0.393

## APPENDICE 4 - Unità di misura – Sistema Internazionale

Per caratterizzare un sistema fisico, siamo soliti definirne le proprietà: tali sono ad esempio la lunghezza, il volume, la temperatura, etc. *Misurare* vuol dire *assegnare mediante una procedura codificata un numero per rappresentare una proprietà*. Alcune misure (es. quelle di lunghezza sono di tipo *diretto*, ovvero si va a vedere quante volte un campione (in questo caso il metro, od un suo multiplo o sottomultiplo) è contenuto nella grandezza da misurare. La maggior parte delle misure è tuttavia di tipo *indiretto*, ovvero si misura in realtà una proprietà correlata in maniera nota a quella da misurare effettivamente: nel caso della temperatura, si misura la lunghezza di una colonnina di mercurio, o la differenza di potenziale ai capi di un dispositivo elettronico.

Le unità di misura sono state definite dall'uomo nel corso della storia in maniera caotica e scoordinata. Soltanto all'inizio dell'800, con la introduzione del sistema metrico decimale, è iniziato un processo di razionalizzazione e unificazione, che è culminato nella creazione del Sistema Internazionale di Unità di Misura, indicato semplicemente come sistema SI.

Tale sistema è basato sulla definizione di:

- un numero limitato di *grandezze fondamentali*, le cui unità sono definite dalla loro stessa procedura di misura;
- e di *grandezze derivate*, le cui unità di misura derivano dalle leggi fisiche che le definiscono.

Ad esempio, una volta definite le unità fondamentali di spazio (il metro, m) e tempo (il secondo, s), non è necessaria una ulteriore unità fondamentale per la velocità: essendo la velocità uguale allo spazio diviso il tempo, la sua unità è m/s.

Le grandezze fondamentali di cui abbiamo bisogno sono solo sette: *lunghezza* (metro, m), *tempo* (secondo, s), *massa* (chilogrammo, kg), *temperatura* (kelvin, K), *corrente elettrica* (ampere, A), *ammontare di sostanza* (mole, mol), *intensità luminosa* (candela, cd). Le loro definizioni sono riportate alla fine di questo paragrafo. Recentemente, le definizioni di chilogrammo e kelvin sono state aggiornate per potere fare a meno di uno standard fisico

Tra le numerosissime grandezze derivate, quelle che ci interessano maggiormente sono la *forza* (newton,  $N=kg\ m/s^2$ ), il *lavoro* (joule,  $J=N\ m$ ) e la *potenza* (watt,  $W=J/s$ ).

Le unità definite con questa procedura hanno il pregio della razionalità, in quanto non richiedono l'introduzione di fattori di conversione all'interno delle formule; per contro, talvolta esse sono troppo grandi o troppo piccole rispetto alle grandezze con cui di ha a che fare in pratica, per cui è necessario usare i loro multipli o sottomultipli. Essi si ottengono aggiungendo un prefisso alla grandezza. I prefissi definiti variano da  $10^{-24}$  a  $10^{24}$  e sono riportati nella seguente tabella 1.

Prefisso	Simb.	Fattore	Prefisso	Simb.	Fattore	Prefisso	Simb.	Fattore
yotta	Y	$10^{24}$	etto	h	$10^2$	milli	m	$10^{-3}$
zetta	Z	$10^{21}$	deca	da	$10^1$	micro	$\mu$	$10^{-6}$
exa	E	$10^{18}$				nano	n	$10^{-9}$
peta	P	$10^{15}$				pico	p	$10^{-12}$
tera	T	$10^{12}$				femto	f	$10^{-15}$
giga	G	$10^9$				atto	a	$10^{-18}$
mega	M	$10^6$	deci	d	$10^{-1}$	zepto	z	$10^{-21}$
kilo	k	$10^3$	centi	c	$10^{-2}$	yocto	y	$10^{-24}$

**Tabella 1:** prefissi per multipli e sottomultipli nel sistema SI.

La pressione (forza diviso superficie) ha come unità di misura  $N/m^2$ , detto anche *pascal* (Pa). La pressione atmosferica standard equivale a 101325 Pa, per cui nella pratica si usano i multipli kPa o MPa. E' molto usato anche il *bar* (100 kPa) che però non è un multiplo standard del sistema SI.

Accanto alle unità SI (il cui uso è obbligatorio per legge nei documenti ufficiali, anche se spesso questa regola viene violata) sopravvivono le vecchie unità pratiche, che è necessario convertire con appositi fattori di conversione (vedi tabelle seguenti). Ad esempio, sono unità pratiche di energia la kilocaloria (1 kcal = 4186 J) ed il chilowattora (1 kWh = 3.6 MJ), la British Thermal Unit (1 BTU= 1016 J).

Per maggiori dettagli si veda ad es. Colombo, Manuale dell'Ingegnere, ed. Hoepli, sezione P.

**Tablelle di conversione tra unità di misura**

a) Unità di forza

Unità di misura	N	dine	kgf	pdl	lbf
1 N =	1	$10^5$	0.102	7.23	0.225
1 dina =	$10^{-5}$	1	$1.02 \cdot 10^{-6}$	$7.23 \cdot 10^{-5}$	$2.25 \cdot 10^{-6}$
1 kgf =	9.80665*	$9.81 \cdot 10^5$	1	70.9	2.205
1 pdl** =	0.138	$1.38 \cdot 10^4$	$1.41 \cdot 10^{-2}$	1	0.031
1 lbf =	4.44	$4.44 \cdot 10^5$	0.4536	32.1740	1

\* valore esatto per convenzione internazionale approssimato a 9.81 nei calcoli pratici

\*\* (lbf ft/s<sup>2</sup>) Poundal

b) Unità di pressione

Unità di misura	Pa	bar	atm	torr	at	Kgf/m <sup>2</sup>	psi
1 Pa =	1	$10^{-5}$	$9.87 \cdot 10^{-6}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$1.02 \cdot 10^{-5}$	0.102	$1.45 \cdot 10^{-4}$
1 bar =	$10^5$	1	0.987	$7.5 \cdot 10^{-2}$	1.02	$102 \cdot 10^{-2}$	14.5
1 atm =	101325	0.01325	1	760	1.033	$1.033 \cdot 10^4$	14.696
1 torr = (mm Hg)	133.322	$1.33 \cdot 10^{-3}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$	1	$1.359 \cdot 10^{-3}$	13.595	$1.93 \cdot 10^{-2}$
1 at =	98066.5	0.980665	0.968	735.5	1	$10^4$	14.22
1 kgf/m <sup>2</sup>	9.80665	$9.81 \cdot 10^{-5}$	$9.68 \cdot 10^{-5}$	$7.355 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4}$	1	$1.42 \cdot 10^{-3}$
1 psi (lbf/in <sup>2</sup> )	6894.76	$6.89 \cdot 10^{-2}$	$6.8 \cdot 10^{-2}$	51.7	$7.03 \cdot 10^{-2}$	703.07	1
1 baria (dine/cm <sup>2</sup> )	0.1	$10^{-6}$	$9.87 \cdot 10^{-7}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-6}$	0.0102	$1.45 \cdot 10^{-5}$

c) Unità di energia

Unità di misura	J	erg	kgf m	kWh	Cvh	kcal <sub>IT</sub>	lbf ft	Btu <sub>IT</sub>
1 J=	1	10 <sup>7</sup>	0.102	2.78 10 <sup>-7</sup>	3.78 10 <sup>-7</sup>	0.239 10 <sup>-3</sup>	0.783	0.948 10 <sup>-3</sup>
1 erg=	10 <sup>-7</sup>	1	0.102 10 <sup>-7</sup>	2.78 10 <sup>-14</sup>	3.78 10 <sup>-14</sup>	0.239 10 <sup>-10</sup>	0.783 10 <sup>-7</sup>	0.948 10 <sup>-10</sup>
1 kgf m=	9.80665	9.81 10 <sup>7</sup>	1	2.72 10 <sup>-6</sup>	3.704 10 <sup>-6</sup>	2.34 10 <sup>-3</sup>	7.23	9.3 10 <sup>-3</sup>
1 kWh=	3.6 10 <sup>6</sup>	3.6 10 <sup>13</sup>	3.6 10 <sup>5</sup>	1	1.3596	859.845	2.66 10 <sup>6</sup>	3.41 10 <sup>3</sup>
1 Cvh=	2.648 10 <sup>6</sup>	2.648 10 <sup>13</sup>	270000	0.735	1	632.4	1.953 10 <sup>6</sup>	2509.6
1 kcal <sub>IT</sub> =	4186.8	4186.8 10 <sup>7</sup>	426.9	1.163 10 <sup>-3</sup>	1.58 10 <sup>-3</sup>	1	3.09 10 <sup>3</sup>	3.97
1 lbf ft=	1.36	1.36 10 <sup>7</sup>	0.138	3.77 10 <sup>-7</sup>	5.12 10 <sup>-7</sup>	3.24 10 <sup>-4</sup>	1	1.29 10 <sup>-3</sup>
1 Btu <sub>IT</sub> =	1055.06	1055.06 10 <sup>7</sup>	107.6	2.93 10 <sup>-4</sup>	3.98 10 <sup>-4</sup>	0.252	778.169	1

d) Unità di potenza

Unità di misura	W	kgf m/s	Cv	kcal <sub>IT</sub> /h	ft lbf/s	Btu <sub>IT</sub> /h
1 W=	1	0.102	1.36 10 <sup>-3</sup>	0.8594	0.738	3.414
1 kgf m/s=	9.80665	1	1.33 10 <sup>-2</sup>	8.432	7.23	33.46
1 Cv=	735.5	75	1	632.4	542.5	2509.6
1 kcal <sub>IT</sub> /h=	1.163	0.1186	1.58 10 <sup>-3</sup>	1	0.585	3.97
1 ft lbf/s=	1.36	0.138	1.84 10 <sup>-3</sup>	1.166	1	4.626
1 Btu <sub>IT</sub> /h=	0.293	2.988 10 <sup>-2</sup>	3.98 10 <sup>-4</sup>	0.252	0.216	1

*Costanti fisiche notevoli*

Costante universale dei gas	$R = 8.31445 \pm 0.00034 \text{ kJ/kmol K}$
Numero di Avogadro	$N_A = 6.022214076 \times 10^{26} \text{ molecole/kmol}$
Volume molare del gas ideale in condizioni normali (1 bar e 273.15 K)	$V_0 = 22.4139 \pm 0.0006 \text{ m}^3/\text{kmol}$
Pressione atmosferica standard (a livello del mare)	$p = 101.325 \text{ kPa}$
Accelerazione standard di gravità	$g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$
Costante di Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5.673 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
Costante di Planck	$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Costante di Boltzmann	$k = 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Velocità della luce nel vuoto	$c_0 = (2.997925 \pm 0.000003) \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Carica dell'elettrone	$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$

*Definizioni delle grandezze fondamentali*

- **secondo (s)**: la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.
- **metro (m)**: lunghezza del tragitto percorso dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/(299 792 458) di secondo.
- **kilogrammo (kg)**:  $1.4755214 \times 10^{40} (9 \ 192 \ 631 \ 770 \ h / c^2)$  dove  $h$  è la costante di Planck e  $c$  la velocità della luce. In pratica, ci si basa sul valore della costante di Planck che è pari a  $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s} = \text{kg m}^2/\text{s}$  e sulle definizioni di metro e secondo. In precedenza: la massa del prototipo internazionale del kilogrammo, conservato al museo di pesi e misure di Sevres, Parigi.

- **ampere (A)**: la corrente elettrica che corrisponde al passaggio di  $1/e$  cariche elementari per secondo dove  $e = 1.602176634 \times 10^{-19}$  C è la *carica dell'elettrone*. In precedenza: l'intensità di una corrente elettrica costante che, mantenuta in due conduttori rettilinei paralleli di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile, posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro nel vuoto, produrrebbe tra gli stessi una forza pari a  $2 \times 10^{-7}$  N per metro di lunghezza.
- **kelvin (K)**: Un kelvin è la differenza di temperatura termodinamica corrispondente a una differenza di energia termica pari a  $k_B T$ , dove  $k_B = 1.380649 \times 10^{-23}$  J/K è il valore della *costante di Boltzmann*. (definizione precedente: la frazione  $1/273.16$  della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua).
- **mole (mol)**: la quantità di sostanza di un sistema che contiene un numero di atomi pari al *numero di Avogadro*  $= 6.022214076 \times 10^{23}$ .
- **candela (cd)**: l'intensità luminosa, in una determinata direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz e la cui intensità in tale direzione è di  $1/683$  di watt per steradiante.

### **APPENDICE 5 – Metodologia di risoluzione di problemi di termodinamica**

Il primo passo in una analisi termodinamica è la identificazione del sistema delle sue interazioni con l'esterno (es. il sistema è chiuso, aperto, le pareti sono adiabatiche, etc.).

Devono quindi essere prese in considerazione le leggi fisiche che governano il comportamento del sistema e le altre relazioni pertinenti (es. leggi costitutive della sostanza presente nel sistema).

Nella maggior parte delle analisi si usano, direttamente o indirettamente, una o più delle seguenti tre equazioni di bilancio, che sono *indipendenti dalla particolare sostanza o sostanze considerate e dal tipo di trasformazione che avviene*:

- conservazione della massa
- conservazione dell'energia
- secondo principio della termodinamica

In aggiunta, di solito è necessario aggiungere i legami tra le proprietà della particolare sostanza o sostanze considerate: le cosiddette *equazioni di stato* della sostanza.

Per ottenere buoni risultati è necessario seguire un approccio sistematico. Bisogna evitare la tentazione di cominciare il problema dal mezzo, selezionando ad esempio alcune equazioni che sembrano appropriate, sostituendo numeri o semplicemente affidarsi al calcolatore.

E' fortemente consigliato perciò che la soluzione di un problema sia organizzata utilizzando i seguenti passi.

**Variabili note:** Descrivere concisamente e con parole proprie che cosa è noto. Questo richiede di aver letto il problema attentamente e di aver attentamente pensato ad esso.

**Variabili da determinare:** Definire in maniera concisa e con proprie parole che cosa deve essere determinato.

**Dati schematici:** Disegnare un piccolo quadro rappresentativo del sistema in considerazione. Decidere ad esempio se un sistema chiuso od aperto sono appropriati per l'analisi ed identificarne con precisione il contorno.

Identificare i diagrammi di stato che contengono rilevanti informazioni circa il problema in esame e disegnarli, localizzando i punti chiave e indicando, se possibile, la trasformazione eseguita dal sistema.

**Assunzioni:** Elencare tutte le assunzioni semplificative e le idealizzazioni che possono essere fatte.

**Analisi:** Utilizzando tutte le assunzioni e le idealizzazioni fatte, semplificare le equazioni che governano il fenomeno fino a formare la sequenza di esse che produrrà il risultato.

E' consigliabile lavorare con le equazioni, senza sostituire valori numerici, il più a lungo possibile, per evitare la accumulazione degli errori di arrotondamento nei calcoli successivi. In ogni caso, i calcoli devono essere condotti con un numero di cifre significative superiore (ma non eccessivamente!) a quello con cui si vuole ottenere la soluzione finale.

Quando le equazioni sono ridotte alla loro forma finale, analizzarle per vedere quali dati aggiuntivi sono richiesti. Per quanto possa sembrare ovvio, spesso ci si dimentica che il numero delle incognite deve essere pari a quello delle equazioni *indipendenti* che si hanno a disposizione. Identificare i dati, le tabelle, i diagrammi o le equazioni aggiuntive eventualmente necessarie.

Quando tutti i dati e tutte le equazioni sono disponibili, sostituire i valori numerici all'interno delle equazioni. *Controllare se c'è uniformità a livello dimensionale* e quindi eseguire i calcoli richiesti.

Alla fine, considerare se le grandezze dei valori numerici sembrano ragionevoli e se i segni algebrici associati ai valori numerici sono corretti

# Appunti ed Esercizi di *Fisica Tecnica e Macchine Termiche*

## Appendici 6-7

*Paolo Di Marco*

*Versione 1.00 – 03.01.2022.*

- 6. Risoluzione di parte degli esercizi proposti
- 7. Problemi assegnati nei compiti, 1994-2005

*La presente dispensa è redatta ad esclusivo uso didattico per gli allievi dei corsi di studi universitari dell'Università di Pisa. L'autore se ne riserva tutti i diritti. Essa può essere riprodotta solo totalmente ed al fine summenzionato, non può essere alterata in alcuna maniera o essere rivenduta ad un costo superiore a quello netto della riproduzione. Ogni altra forma di uso e riproduzione deve essere autorizzata per scritto dall'autore.*

*L'autore sarà grato a chiunque gli segnali errori, inesattezze o possibili miglioramenti.*

**APPENDICE 6 – Soluzioni di alcuni degli esercizi proposti**

**Capitolo 1**

*Le soluzioni degli esercizi 1.2-1.16 sono state redatte dallo studente Leonardo Caruso*

**Esercizio 1.2**

Utilizzando la legge di Stevin (Cap. I)  $P_a = P_{atm} + \rho gh = 40.9 \text{ MPa}$

**Esercizio 1.3**

Utilizzando la portata volumetrica ( Cap. I)  $G = wA$  da cui  $D = \sqrt{\frac{4G}{\pi w}} = 7 \text{ m}$

**Esercizio 1.4**

L'ossido nitroso si può considerare un gas ideale. Dalla relazione tra energia interna, temperatura e volume (Cap. I)

$$du = c_v dT + B_u dv = c_v dT \quad \text{per un gas ideale}$$

quindi  $u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \Rightarrow u_2 = c_v T = 80880 \text{ J/kg}$

si ha inoltre

$$e_c = \frac{1}{2} w^2 = 12.5 \text{ J/kg}, \quad e_p = gh = 1177 \text{ J/kg}$$

**Esercizio 1.5**

In un sistema chiuso il lavoro di dilatazione è dato da (Cap. I)

$$L_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_1 \int_{V_1}^{V_2} dV = p_1 (V_2 - V_1) = 4 \cdot 10^5 \cdot (0.36 - 0.15) = 84 \text{ kJ}$$

notare che non è necessario moltiplicare per la massa del sistema, dato che il volume indicato è quello totale e non quello specifico.

**Esercizio 1.6**

Il lavoro di dilatazione (analogamente al caso precedente) sarà

$$L_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \text{const} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = p_1 V_1 \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = 4 \cdot 10^5 \cdot 0.15 \cdot \ln \left( \frac{0.36}{0.15} \right) = 52.5 \text{ kJ}$$

**Esercizio 1.7**

Il lavoro di dilatazione (analogamente al caso precedente) sarà

$$L_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\text{const}}{V^n} dV = p_1 V_1^n \int V^{-n} dV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n}$$

con

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

e quindi

$$L_{12} = \left[ p_1 V_2 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^n - p_1 V_1 \right] \frac{1}{1-n} = \left[ 4 \cdot 10^5 \cdot 0.36 \cdot \left( \frac{0.15}{0.36} \right)^{1.4} - 4 \cdot 10^5 \cdot 0.15 \right] \cdot \frac{1}{1-1.4} = 44.3 \text{ kJ}$$

**Esercizio 1.9**

Dalla definizione di volume specifico (Cap. I) si giunge al volume iniziale e quello finale,

rispettivamente indicati nelle soluzioni come

$$V_1 = Mv_1 = 1,5 \cdot 83,54 \cdot 10^{-3} = 0,125 \text{ m}^3$$

$$V_2 = Mv_2 = 1,5 \cdot 21,34 \cdot 10^{-3} = 0,0032 \text{ m}^3$$

il valore di  $n$  può essere determinato risolvendo l'equazione esponenziale

$$pv^n = \text{const} \Rightarrow p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

$$\ln p_1 + n \ln v_1 = \ln p_2 + n \ln v_2$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)} = 1,18$$

che poteva essere anche risolta numericamente, es. con il risolutore di Excel.

Il lavoro infine è

$$\begin{aligned} L_{1 \rightarrow 2} &= M \int_{v_1}^{v_2} p dv = M \int_{v_1}^{v_2} \frac{\text{const}}{v^n} dv = M \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-n} = \\ &= 1,5 \cdot (1 \cdot 10^6 \cdot 21,34 \cdot 10^{-3} - 200 \cdot 10^3 \cdot 83,54 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{1}{1-1,18} = -38,6 \text{ kJ} \end{aligned}$$

### Esercizio 1.10

Allo stato 2 si giunge a un volume dato da

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2} = \frac{300 \cdot 0,019}{150} = 0,038 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

il lavoro specifico sarà dato dalla somma dei lavori delle singole trasformazioni

$$\begin{aligned} l_{13} &= l_{12} + l_{23} = \int_{v_1}^{v_2} p dv + \int_{v_2}^{v_3} p dv = p_1 v_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + p_2 (v_3 - v_2) = \\ &= 3 \cdot 10^5 \cdot 0,019 \ln 2 - + 15 \cdot 10^4 \cdot 0,019 = 1,1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

### Esercizio 1.11

Applicando il I principio della Termodinamica (Cap. I) si ottiene

$$L = Q - U = (85 - 800) \cdot 10^3 = 50 \text{ kJ}$$

### Esercizio 1.12

a) In un sistema aperto a regime, per una compressione reversibile, il lavoro da fornire per unità di massa sarà dato da

$$l'_{12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = - p_1 v_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = - 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,5 \ln\left(\frac{0,4}{0,1}\right) = - 208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

b) In tal caso si ha

$$L = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = - v (p_2 - p_1) = - 1,5 \cdot (400 \cdot 10^3 - 0,1 \cdot 10^6) = - 400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### Esercizio 1.13

a) Dato che il contenitore è a pareti rigide, l'effetto del mulinello non comporterà alcuna variazione del volume dell'aria, ed essendo il contenitore chiuso non varierà neppure il volume specifico. Quindi

$$v_2 = v_1 = \frac{1}{\rho} = 0.83 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

b) Applicando il I principio della Termodinamica e considerando che

$$l_{12} = 0 \quad (\text{contenitore rigido})$$

$$\Delta u = q_{12} = \frac{W\Delta t}{V\rho} = \frac{40 \cdot 20 \cdot 60}{0.2 \cdot 1.2} = 200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### Esercizio 1.14

Applicando il I principio della Termodinamica si ottiene:

$$1 \rightarrow 2: \quad U_2 - U_1 = Q_{12} - \Delta L, \quad V_1 = V_2, \quad \Delta L = 0$$

$$2 \rightarrow 3: \quad U_3 - U_2 = Q_{23} - \Delta L, \quad \Delta L = p_2(V_3 - V_2)$$

Da cui

$$V_3 - V_1 = \frac{1}{p_2}(Q_{23} + U_2 - U_3)$$

$$U_2 = Q_{12} + U_1$$

$$V_3 - V_1 = \frac{1}{p_2}(Q_{23} + Q_{12} + U_1 - U_3) = -5.625 \text{ m}^3$$

notare che l'ultima relazione poteva essere ricavata applicando direttamente il I principio alla trasformazione 2-3.

### Esercizio 1.15

Essendo un sistema chiuso a regime si ha

$$dQ = dL, \text{ ovvero } W_t = W_m + W_{el}$$

La potenza meccanica erogata dal motore può essere calcolata come (ricordare che il momento va espresso in N/m e la velocità angolare in rad/s)

$$W_m = M\Omega = 2 \cdot 9.8 \cdot \frac{500 \cdot 2\pi}{60} = 1025.7 \text{ W}$$

la potenza termica scambiata dal motore è la somma algebrica delle potenze elettrica e meccanica

$$W_t = W_m + W_{el} = 1025.7 - 1500 = -474 \text{ W}$$

dove il segno negativo indica che il calore viene ceduto all'esterno. Si ha quindi

$$Q = W_t \cdot \Delta t = -1.7 \text{ MJ}$$

la temperatura del motore può essere calcolata da

$$W_t = hA(T_c - T_a)$$

$$T_c = T_a \frac{W_t}{hA} = 114.8^\circ\text{C}$$

### Esercizio 1.16

Poiché abbiamo un ciclo termodinamico possiamo dire che

$$\Delta U = 0, \quad Q_{ciclo} = L_{ciclo}$$

calcoliamo quindi

$$L_{ciclo} = L_{12} + L_{23} + L_{31}$$

essendo la trasformazione 2-3 isovolumica si ha  $L_{23} = 0$ ; è noto inoltre che  $L_{31} = 150 \text{ kJ}$  e infine

$$L_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_1 V_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 1 \cdot 10^5 \cdot 1.5 \cdot \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -103 \text{ kJ}$$

si ha quindi

$$L_{tot} = Q_{tot} = 47 \text{ kJ}$$

### Esercizio 1.18

a. Si può applicare il primo principio della termodinamica ad ogni trasformazione del ciclo, per cui

$$\Delta U_{12} = Q_{12} - L_{12}$$

$$\Delta U_{23} = Q_{23} - L_{23}$$

$$\Delta U_{31} = Q_{31} - L_{31}$$

In relazione al ciclo completo, la variazione di energia interna è nulla, quindi:

$$\Delta U_{12} + \Delta U_{23} + \Delta U_{31} = 0$$

Quindi

$$\Delta U_{12} = 23 - 5 = 18 \text{ kJ}$$

$$\Delta U_{23} = -50 - 0$$

$$\Delta U_{31} = -(\Delta U_{12} + \Delta U_{23}) = -(18 - 50) = 32 \text{ kJ}$$

Il lavoro scambiato nella terza trasformazione, essendo  $Q_{31}=0$ , vale  $L_{31}=-32 \text{ kJ}$ .

## Capitolo 2

Le soluzioni degli esercizi 2.1-2.13 sono state redatte dallo studente Leonardo Caruso

Le soluzioni degli esercizi 2.14-2.17 sono state redatte dallo studente Giacomo Garofalo

### Esercizio 2.1

Considerando l'Argon come un gas ideale

$$pV = MRT \rightarrow M = \frac{pV}{RT} = \frac{200 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{293 \cdot 208.18} = 1.639 \text{ kg}$$

il volume occupato in condizioni normali è ottenibile tramite la medesima legge

$$pV = MRT \rightarrow V = \frac{MRT}{p} = \frac{1.639 \cdot 208.18 \cdot 273.15}{1 \cdot 10^5} = 0.932 \text{ m}^3$$

### Esercizio 2.2

Considerando l'azoto un gas perfetto si ha

$$pV = MRT$$

$$p = p_e + p_c = p_e + \frac{F_e}{S} = p_e + \frac{M_p g}{\pi D^2} = 97 \cdot 10^3 + \frac{5 \cdot 9.8}{\pi \cdot 0.0025^2} = 103.23 \text{ kPa}$$

e

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{103.23 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{296.8 \cdot 373.15} = 1.864 \text{ kg}$$

### Esercizio 2.4

Considerando  $x = \frac{M_v}{M}$  ed impostando le equazioni si ottiene

$$\left( \begin{array}{l} V = V_l + V_v \\ V_v = \frac{8}{10} V \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{l} Mv = M_l v_l + M_v v_v \\ M_v v_v = \frac{8}{10} Mv \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{l} v = \frac{M_l v_l}{M} + \frac{M_v v_v}{M} \\ v = \frac{10 \cdot M_v v_v}{8 \cdot M} \end{array} \right)$$

ed essendo anche  $\frac{M_l}{M} = (1-x)$

$$\left( \begin{array}{l} v = (1-x)v_l + xv_v \\ v = \frac{8}{10} xv_v \end{array} \right) \rightarrow (1-x)v_l + xv_v = \frac{10}{8} xv_v$$

$$x = \frac{v_l}{\frac{10}{8} v_v - v_v + v_l} = \frac{0.001121}{\frac{10}{8} \cdot 0.194045 + 0.001127} = 0.022$$

Utilizzeremo la legge di Stevin per calcolare  $\Delta p$

$$\Delta p = p_{10m} - p_{0m} = \rho_l g h_l + \rho_v g h_v \cong \frac{g h_l}{v_l} = \frac{2 \cdot 9.8}{0.001191} = 17391 \text{ Pa}$$

### Esercizio 2.5

$$v = v_l + x(v_g - v_l) \rightarrow x = \left( \frac{V}{M} - v_l \right) \frac{1}{v_g - v_l} = \left( \frac{0.1}{10.79} - 0.000757 \right) \cdot \left( \frac{1}{0.029132 - 0.000757} \right) = 0.3$$

$$h = h_l + x(h_g - h_l) = 56.799 + 0.3 \cdot (196.568 - 56.799) = 98.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

la soluzione può anche essere verificata tramite il programma CATT.

### Esercizio 2.6

$$v = v_l + x(v_g - v_l) \rightarrow x = \left( \frac{V}{M} - v_f \right) \cdot \left( \frac{1}{v_v - v_f} \right) = \left( \frac{0.1}{1.5} - 0.001658 \right) \cdot \left( \frac{1}{0.1285 - 0.0016} \right) = 0.51$$

### Esercizio 2.7

Nel caso che i calori specifici siano costanti, si ottiene:

$$\Delta h = c_p \Delta T = 1039.15 \cdot (1100 - 300) = 831 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta u = c_v \Delta T = (1100 - 300) \cdot 742 = 593 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta s = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - \int_{p_1}^{p_2} \frac{R}{P} dp = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 1039 \ln\left(\frac{1100}{300}\right) - 296.91 \ln\left(\frac{13 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5}\right) = 588 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Utilizzando la relazione polinomiale che lega  $c_p$  alla temperatura si ha invece, dopo aver sviluppato gli integrali (v. dispense, Cap.III)

$$\Delta h = R \left[ \alpha(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{\gamma}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{\delta}{4}(T_2^4 - T_1^4) + \frac{\epsilon}{5}(T_2^5 - T_1^5) \right] = 882.1 \text{ J/kg}$$

$$\Delta u = \Delta h - \Delta(pv) = \Delta h - R\Delta T = 644.6 \text{ J/kg}$$

$$\Delta s = R \left[ \alpha \ln \frac{T_2}{T_1} + \beta(T_2 - T_1) + \frac{\gamma}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{\delta}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{\epsilon}{4}(T_2^4 - T_1^4) \right] - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 649.6 \text{ J/kg K}$$

### Esercizio 2.8

Si calcolano i valori della pressione e della temperatura ridotte

$$p_r = \frac{p}{p_c} = \frac{2}{11.28} = 0.18 \quad T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{373}{405.4} = 0.92$$

dal diagramma di Fig.8, Cap.III, si ottiene approssimativamente  $Z = 0.9$ .

con l'utilizzo del programma CATT si ha

$$Z = \frac{pv}{RT} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 0.08248}{488.38 \cdot 373.15} = 0.905$$

### Esercizio 2.9

Tracciando una trasformazione isovolumica sul diagramma  $p-v$  è facile convincersi che

- se  $v < v_{crit}$  lo stato finale è liquido;
- se  $v > v_{crit}$  lo stato finale è vapore surriscaldato.

Dato che per l'acqua si ha  $v_{crit} = 0.0031 \text{ m}^3/\text{kg}$ , ne segue che nel caso a) ( $v = 0.0015 \text{ m}^3/\text{kg}$ ) lo stato finale è liquido, mentre nel caso b) ( $v = 0.0150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ) lo stato finale è vapore surriscaldato.

### Esercizio 2.10

La massa è nota una volta noto il volume specifico

$$Mv = V \rightarrow M = \frac{V}{v}$$

Per il gas ideale si ha quindi

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{518.46 \cdot 298.15}{2 \cdot 10^7} = 0.00773 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$M = \frac{V}{v} = \frac{0.5}{0.00773} = 64.7 \text{ kg}$$

Mentre nello stesso caso, prendendo il valore di  $v$  dalle tabelle, si ha

$$v = 0.00637 \text{ m}^3/\text{kg} \Rightarrow M = \frac{V}{v} = \frac{0.5}{0.00637} = 78.5 \text{ kg}$$

La differenza è dovuta al fatto che nelle condizioni specificate il metano si discosta leggermente dalle condizioni di gas ideale.

Per il vapore saturo, dal CATT

$$v = 0.00382 \text{ m}^3/\text{kg} \Rightarrow M = \frac{V}{v} = \frac{0.5}{0.00382} = 130.9 \text{ kg}$$

lo stesso valore poteva essere determinato, dopo aver ricavato  $v_l$  e  $v_g$  dalle tabelle termodinamiche, tramite

$$v = v_l + x(v_g - v_l)$$

### Esercizio 2.11

È una trasformazione reversibile isoterma, e, dato che il vapore è saturo, anche isobara; mediante il programma CATT o le tabelle termodinamiche si ottengono i seguenti valori

$$p_1 = 0.1 \text{ MPa}, T_1 = 99.9 \text{ }^\circ\text{C}, x_1 = 1, u_1 = 2506 \text{ kJ/kg}, s_1 = 7.35 \text{ kJ/kg K}, v_1 = 1.694 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_2 = 0.1 \text{ MPa}, T_2 = 99.9 \text{ }^\circ\text{C}, x_2 = 0, u_2 = 414.13 \text{ kJ/kg}, s_2 = 1.306 \text{ kJ/kg K}, v_2 = 0.001443 \text{ m}^3/\text{kg}$$

si ha inoltre

$$\begin{cases} du = dq - dl \\ Tds = dq \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u_2 - u_1 = q_{12} - l_{12} \\ q_{12} = T(s_2 - s_1) \end{cases}$$

$$l_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) \quad L_{12} = M l_{12} = -42.3 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = M(u_2 - u_1) = -522 \text{ kJ}$$

$$Q_{12} = \Delta U + L_{12} = -564 \text{ kJ}$$

$$\Delta S = M(s_2 - s_1) = -1.51 \text{ kJ/K}$$

si può anche verificare che (essendo la trasformazione isoterma)

$$\Delta S = \frac{Q_{12}}{T}$$

### Esercizio 2.12

Si ha a che fare con un sistema chiuso. Ovviamente  $T_2 = T_1 = 298.15 \text{ K}$ .

La temperatura nello stato finale 3 può essere ottenuta da

$$T_3 p_3^{\frac{1-k}{k}} = T_2 p_2^{\frac{1-k}{k}} \quad \frac{k-1}{k} = \frac{R}{c_p} = 0.2893$$

$$T_3 = T_2 \left( \frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{R}{c_p}} = 298.15 \cdot \left( \frac{20}{1} \right)^{-0.289} = 125.3 \text{ K}$$

(Notare che in tali condizioni il modello di gas ideale potrebbe cadere in difetto).

Il volume finale  $v_3$  è dato da

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{287 \cdot 125.3}{1 \cdot 10^5} = 0.36 \text{ m}^3/\text{kg}$$

(Notare: nella formula per il calcolo di  $T$ , in cui compare il rapporto delle pressioni, non è stato necessario convertire le medesima in Pa; è stato invece necessario convertire la temperatura in K; nella formula per il calcolo di  $v$  invece la conversione della pressione in Pa è indispensabile)

Il lavoro si trova sommando i contributi delle trasformazioni isoterma e adiabatica

$$l_{13} = l_{12} + l_{23} = -RT_1 \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) + \frac{R}{k-1} (T_2 - T_3)$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{R - c_p} = 1.407$$

$$l_{13} = -287 \cdot 298.5 \cdot \ln \left( \frac{20}{1} \right) + 705 \cdot (298.15 - 125.3) = -135 \text{ kJ/kg}$$

notare che il lavoro ha un contributo negativo (compressione isoterma) ed uno positivo (espansione adiabatica): il primo predomina sul secondo, come ci si può rendere conto tracciando le trasformazioni in un diagramma  $p-v$ .

Il calore viene scambiato solo nella prima trasformazione ed è dato da

$$q_{13} = q_{12} = -RT_1 \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) = -256 \text{ kJ/kg}$$

### Esercizio 2.13

La pressione interna è la somma di quella esterna più il contributo dovuto al peso del mantello:

$$p_i = p_e + \frac{Mg}{\pi R^2} = 980 \cdot 100 + \frac{500000 \cdot 9.81}{\pi 20^2} = 98000 + 3900 = 1019 \text{ hPa}$$

il dislivello nella guardia idraulica può essere determinato tramite la legge di Stevin

$$\Delta L = \frac{p_e - p_i}{\rho_{H_2O} g} = \frac{3900}{1000 \cdot 9.81} = 0.397 \text{ m}$$

e la massa di metano contenuta è data da

$$M = \frac{p_i V}{RT} = \frac{p_i}{RT} \frac{\pi D^2}{4} H = 12400 \text{ kg}$$

nel caso in cui la pressione atmosferica aumenta, aumenta anche la pressione interna ed il volume si riduce in ragione inversamente proporzionale alla pressione

$$\frac{V'}{V} = \frac{H'}{H} = \frac{p_i}{p_i'} \Rightarrow H' = H \frac{p_i}{p_i'} = 15 \frac{1019}{1079} = 14.16 \text{ m}$$

$$\Delta H = H - H' = 0.83 \text{ m}$$

invece, il dislivello nella guardia idraulica, che dipende solo dalla differenza di pressione tra interno ed esterno, e quindi dal peso del mantello, rimane invariato.

### Esercizio 2.14

L'aria può essere considerata un gas ideale con  $R = 287 \text{ J/kg K}$  e  $c_p = 1004 \text{ J/kg K}$

1. La massa di aria si calcola quindi con l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot 400} = 1.74 \text{ kg}$$

2. La pressione nel recipiente quando  $T = 27^\circ\text{C} = 300.15 \text{ K}$  vale:

$$p = \frac{MRT}{V} = \frac{1.74 \cdot 287 \cdot 300.15}{40 \cdot 10^{-3}} = 3.75 \text{ MPa}$$

3. Il calore scambiato durante il processo si calcola con il primo principio della termodinamica, ricordando che, siccome il recipiente ha le pareti rigide, il sistema non può scambiare lavoro meccanico:

$$du = dq - \cancel{dl}$$

Per i gas perfetti vale:

$$du = c_v dT = 716.5 \cdot (400 - 300.15) = 71.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta Q = -M \cdot du = -1.74 \cdot 71.5 = -123 \text{ kJ}$$

Il segno meno è dovuto al fatto che il calore scambiato durante il processo, viene ceduto dal sistema all'ambiente.

### Esercizio 2.15

	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$v$ [ $\text{m}^3/\text{Kg}$ ]	$p$ [Mpa]	$x$
1	20	0.09284	0.2896	-
2	-20	0.09284	0.2448	1

Le celle evidenziate contengono i valori di input.

Comincio dallo stato 2, visto che conosco due variabili indipendenti (che quindi caratterizzano il sistema): temperatura e titolo. Lo stato 1 risulta determinato dalla conoscenza della temperatura e del volume (che rimane costante).

### Esercizio 2.16

	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$u$ [kJ/Kg]	$s$ [kJ/ kg K]	$x$
1	70	1164	3.675	0.4
2	341.5	1577	3.675	0

Le celle evidenziate contengono i valori di input.

L'entropia rimane costante grazie alla condizione di adiabaticità ( $dq=0$ ) unita a quella di reversibilità della compressione.

Proprio grazie all'adiabaticità, il primo principio si può scrivere nel modo seguente:

$$du_{21} = \cancel{dq_{21}} - dl_{21}$$

$$dl_{21} = -du_{21} = -(1577 - 1164) = -413 \text{ kJ/kg}$$

Com'era logico attendersi, il segno è negativo in quanto il lavoro di compressione viene svolto dall'ambiente sul sistema.

$$L_{21} = M \cdot dl_{21} = 50 \cdot (-413) = -20.6 \text{ MJ}$$

**Esercizio 2.17**

	$T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$p$ [MPa]	$v$ [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]	$h$ [kJ/kg]	$u$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]	$x$
1	200	0.2	1.08	2870.47	2654.40	7.507	-
2	200	2	$1.156 \cdot 10^{-3}$	852.62	850.31	2.330	-

Le celle evidenziate contengono i valori di input.

$$V_1 = M \cdot v_1 = 0.2 \cdot 1.08 = 0.216 \text{ m}^3$$

$$V_2 = M \cdot v_2 = 0.2 \cdot 1.156 \cdot 10^{-3} = 2.31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Il calore scambiato in una compressione isoterma è dato dalla seguente relazione:

$$|q_{12}| = T \cdot ds_{12} = T (s_1 - s_2) = 2450 \text{ kJ/kg}$$

L'espressione del calore appena calcolata ha però valore negativo dato che il calore viene ceduto dal sistema all'ambiente; bisognerà ricordarlo quando non si lavora più con i valori assoluti.

$$Q_{12} = M \cdot q_{12} = -490 \text{ kJ}$$

Il lavoro scambiato si ottiene dall'equazione del primo principio applicata alla trasformazione 1-2 :

$$dl_{12} = dq_{12} - du_{12}$$

$$L_{12} = M \cdot l_{12} = M (q_{12} - u_{12}) = 0.2 [2450 - (2654.40 - 850.31)] = -130 \text{ kJ}$$

Il lavoro ha, come è logico aspettarsi, valore negativo in quanto viene esercitato dall'ambiente sul sistema.

### Capitolo 3

Le soluzioni degli esercizi 3.1-3.4 sono state redatte dallo studente Giacomo Garofalo

#### Esercizio 3.1

Applichiamo l'equazione di bilancio della massa:

$$\frac{dM}{dt} = \sum_i G_i - \sum_u G_u$$

Siccome il nostro sistema è costituito da un cilindro con una sola apertura di ingresso ed una sola di uscita, possiamo riscrivere il bilancio di massa nel seguente modo:

$$\frac{dM}{dt} = G_i - G_u$$

Con alcune considerazioni si può riscrivere la variazione di massa nel tempo  $dM/dt$  come variazione del livello dell'acqua nel tempo  $dL(t)/dt$ .

Dalla definizione di densità otteniamo:

$$M = V \cdot \rho \quad \rightarrow \quad \frac{dM}{dt} = \frac{dV}{dt} \cdot \rho$$

Dove  $dV/dt$  è la variazione di volume nel tempo. Detto volume si può esprimere, secondo la configurazione geometrica del sistema, come quello di un cilindro di altezza  $dL$  e area di base  $A$ :

$$\frac{dV}{dt} = A \cdot \frac{dL}{dt}$$

Otengo così l'espressione cercata:

$$\frac{dM}{dt} = A\rho \frac{dL}{dt}$$

L'equazione differenziale (del primo ordine) che descrive il sistema è

$$\frac{dM}{dt} = G_i - G_u$$

$$A\rho \frac{dL}{dt} = G_i - K \cdot L(t)$$

Integrando, si ottiene:

$$L(t) = \frac{G_i}{K} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

La costante di tempo  $\tau$  vale

$$\tau = \frac{A\rho}{K} = 8.93 \text{ s}$$

Il valore a regime (cioè per  $t \rightarrow \infty$ ) è

$$L_r = \frac{G_i}{K} = 5 \text{ m}$$

La condizione di regime si raggiunge dopo 4-5 costanti di tempo  $\tau$ , ovvero dopo circa 40 secondi.

L'analogia con il processo di carica di un condensatore in un circuito RC-serie è notevole; il circuito è descritto dalla seguente equazione differenziale (anch'essa del primo ordine):

$$E = R \cdot i(t) + \frac{1}{C} \int i \cdot dt$$

integrandola si ottiene l'andamento della corrente nel tempo:

$$i(t) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Dove la costante di tempo vale  $\tau = RC$

La dualità di questo sistema con il precedente è immediata, basta operare le seguenti sostituzioni

$$G_i \rightarrow E$$

$$K \rightarrow R$$

$$1/A\rho \rightarrow C$$

Si osserva che: nel sistema idraulico, l'elemento "reattivo" responsabile dell'unico modo proprio del sistema (e quindi della sua banda passante ovvero della sua prontezza) è  $1/A\rho$

### Esercizio 3.2

Lasciando raffreddare il gas contenuto nella bombola, alla diminuzione della sua temperatura è associata una diminuzione di pressione, data da:

$$p_3 = \frac{MRT_3}{V} = \frac{0.838 \cdot 296.91 \cdot (20 + 273.15)}{5 \cdot 10^{-3}} = 145.88 \text{ bar}$$

Se riattacco la bombola alla linea di alimentazione, questa aumenterà la massa di gas contenuto fino a raggiungere la pressione di 200 bar; anche in questo caso si avrà un innalzamento della temperatura. Usando i risultati già ottenuti nell'esempio 2 si ottiene

$$\Delta M = \frac{V}{kRT_a} \Delta p = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1.4 \cdot 296.91 \cdot (15 + 273.15)} (200 \cdot 10^5 - 145.88 \cdot 10^5) = 0.226 \text{ kg}$$

La massa ora contenuta nella bombola è:

$$M_4 = M + \Delta M = 0.838 + 0.226 = 1.064 \text{ kg}$$

La temperatura finale è:

$$T_4 = \frac{p_4 V}{M_4 R} = \frac{200 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1.064 \cdot 296.91} = 316.54 \text{ K} = 43.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Esercizio 3.3

La potenza termica che attraversa le pareti del serbatoio e riscalda l'azoto liquido, è

$$W_T = uA\Delta T = 0.03 \cdot 4 \cdot (25 + 176.8) = 24.22 \text{ W}$$

Usando i risultati dell'esempio 3, si vede che è possibile dissipare tale potenza, spillando una portata  $G$  di fluido dal serbatoio:

$$W_T = G \left( 1 + \frac{v_f}{v_{fg}} \right) h_{fg}$$

dove

$$v_{fg} = v_g - v_f = 0.039052 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$h_{fg} = h_g - h_f = 168.38 \text{ kJ/Kg}$$

Si ottiene

$$G = \frac{W_T}{\left( 1 + \frac{v_f}{v_{fg}} \right) h_{fg}} = 0.14 \text{ g/s}$$

Ricordando che in 24 ore ci sono 86400 secondi, ricavo la massa di azoto spillata in un giorno:

$$M = G \cdot 86400 = 12 \text{ kg}$$

Si osserva che

$$\frac{v_f}{v_{fg}} \ll 1$$

Per cui è possibile utilizzare l'espressione approssimata (ma più che precisa, per i nostri scopi) per ricavare la portata da spillare:

$$W_T \cong G \cdot h_{fg} \rightarrow G \cong \frac{W_T}{h_{fg}} = 0.14 \text{ g/s}$$

### Esercizio 3.4

In questo caso, il modello di gas ideale non si può applicare al fluido contenuto nella bombola. La relazione da usare è

$$dU = dM \cdot h_a$$

dove  $h_a = h_g = 1412 \text{ kJ/kg}$ , che va integrata numericamente, partendo dallo stato iniziale 0.

Noi assegneremo arbitrariamente dei valori alla massa  $M$ , con i quali calcoleremo il volume specifico e l'energia interna  $U$ :

$$v = V/M$$

$$U = M \cdot h_a$$

Con due valori indipendenti è possibile, facendo uso delle tabelle termodinamiche, individuare lo stato del fluido. Si ripete questo procedimento fino a quando il valore della pressione non è quello desiderato: 10 bar.

	$\Delta M$ [kg]	$M$ [kg]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]	$u$ [kJ/kg]	$p$ [bar]	$T$ [°C]
0	0	0.0071	0.6995	1370	2	20
1	0.1	0.1071	0.045			
2	0.12	0.1271	0.039			
3	0.14	0.1471	0.034			
4	0.1444	0.1515	0.033	2132	10	406

**Capitolo 4**

**Esercizio 4.1** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Sia  $G_1$  la portata di azoto entrante nella tubazione a temperatura  $T_1$ , e  $G_2$  la portata di azoto uscente dalla tubazione a temperatura  $T_2$ , scrivo le equazioni di equilibrio della massa e dell'energia per il sistema:

$$\begin{cases} G_1 = G_2 = G \\ W_t + G(h_1 - h_2) = 0 \end{cases}$$

L'azoto può essere considerato un gas perfetto con  $c_p = 1041.6$  J/kg·K costante quindi:

$$dh = c_p \cdot dT$$

$$W_t = Gc_p(T_2 - T_1) = -332.6 \text{ kW}$$

**Esercizio 4.2** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

	$p$ [MPa]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$x$
1	3	233.94	2750.47	0.97
2	0.1	137	2750.47	-

L'entalpia di una laminazione rimane sempre costante, come si osserva dai bilanci di energia ed entropia del sistema

$$\begin{cases} G(h_1 - h_2) = 0 \Rightarrow h_1 = h_2 \\ G(s_1 - s_2) + \dot{S}_{irr} = 0 \end{cases}$$

Il titolo si può anche calcolare con la seguente relazione, una volta trovate dalle tabelle l'entalpia del liquido saturo ( $h_f$ ) e l'entalpia del vapore saturo secco ( $h_g$ ):

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} = \frac{2750.47 - 1008.62}{2804.29 - 1008.62} = 0.97$$

**Esercizio 4.3** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Considero inizialmente come sistema il solo scambiatore a miscelamento, caratterizzato da due ingressi ( $G_a$  e  $G_s$ ) e un'uscita ( $G_u$ ), e ne scrivo le equazione di equilibrio della massa e dell'energia:

$$\begin{cases} G_s + G_a = G_u \\ G_s h_s + G_a h_a = G_u h_u \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G_s = G_u - G_a \\ h_s = \frac{G_u h_u - G_a h_a}{G_s} \end{cases}$$

$$G_s = G_u - G_a = 0.05 \text{ kg/s}$$

Per calcolare il valore dell'entalpia  $h_s$  è necessario conoscere i valori delle entalpie  $h_u$  e  $h_a$ . Sappiamo però che l'entalpia dell'acqua si può calcolare con ottima approssimazione con la formula:

$$h = 4.2 \cdot T$$

Da cui:

$$h_a = 4.2 \cdot T_a = 84 \text{ kJ/kg}$$

$$h_u = 4.2 \cdot T_u = 124.32 \text{ kJ/kg}$$

$$h_s = \frac{G_u h_u - G_a h_a}{G_s} = \frac{3.05 \cdot 124.32 - 3 \cdot 84}{0.05} = 2543.8 \text{ kJ/kg}$$

La laminazione è un processo isoentalpico, questo significa che  $h_s$  è sia l'entalpia a valle della valvola di laminazione sia l'entalpia del vapore nella linea. Perciò per calcolare il titolo è

sufficiente trovare sulle tabelle l'entalpia del liquido saturo ( $h_f$ ) e l'entalpia del vapore saturo secco ( $h_g$ ) alla pressione di 3MPa:

$$x = \frac{h_s - h_f}{h_g - h_f} = \frac{2543.8 - 1008.4}{2802.3 - 1008.4} = 0.855$$

**Esercizio 4.5** (Soluzione redatta dallo studente Andrea Cosentino)

L'esercizio si risolve nella sua completezza utilizzando i diagrammi di Mollier del vapore acqueo e considerando il funzionamento della turbina ideale per cui si ottengono i seguenti dati:

	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$h$ [J/kg]	$s$ [J/kgK]	$x$
1	40	500	3445	7.09	=
2 <sub>i</sub>	1	99	2575	7.09	0.96

In grigio sono stati evidenziati i dati di input; ora per calcolarci la potenza meccanica all'asse utilizziamo il bilancio di energia applicato alla turbina per cui si ha:

$$W'_m = G(h_1 - h_2)$$

$$W'_m = 0.3(3445 - 2575) = 261 \text{ kW}$$

**Esercizio 4.6** (Soluzione redatta dallo studente Andrea Cosentino)

Sfruttiamo le ipotesi di gas ideale per l'azoto per cui possiamo scrivere:

$$dh = c_p dT$$

$$c_p = \frac{kR}{k-1} = 1020.7 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_p \frac{dT}{T} = R \frac{dp}{p}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{R/c_p} = 698.9 \text{ K}$$

Per cui le equazioni di bilancio applicate al compressore, tenendo in considerazione le ipotesi di gas ideale, assumono la seguente forma:

$$W'_m = Gc_p(T_1 - T_2) = 0.4 \cdot 1020.7 \cdot (293.15 - 698.9) = -165.7 \text{ kW}$$

Se ora consideriamo la trasformazione isoterma allora:

$$dh = c_p dT = 0$$

$$W_t = W'_m$$

Per cui sfruttando il bilancio entropico ci ricaviamo la potenza termica scambiata dai cui ricaviamo anche la potenza all'asse del compressore.

$$G(s_2 - s_1)T = W_t$$

$$GT(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}) = W_t$$

$$W_t = W'_m = -GRT \ln \frac{p_2}{p_1} = -103.93 \text{ kW}$$

**Esercizio 4.7** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Considero l'azoto come un gas perfetto con  $R=296.8 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  e  $c_p=1041.6\text{J/kg}\cdot\text{K}$ .

Scrivo le equazioni di bilancio di energia ed entropia del sistema:

$$\begin{cases} -W'_m + G(h_1 - h_2) = 0 \\ G(s_1 - s_2) + \dot{S}_{irr} = 0 \end{cases}$$

Per i gas perfetti vale la relazione:

$$dh = c_p dT$$

Che combinata con il bilancio energetico mi dà:

$$W'_m = Gc_p (T_1 - T_2) = 216.4 \text{ kW}$$

L'espressione del rendimento isoentropico è

$$\eta_c = \frac{h_{2i} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2i} - T_1}{T_2 - T_1}$$

L'ultimo termine dell'uguaglianza è valido solo per i gas perfetti. La temperatura  $T_{2i}$ , ignota, si ricava ipotizzando la trasformazione isoentropica e quindi si può scrivere:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} = 0$$

Da cui si ricava

$$c_p \ln \frac{T_{2i}}{T_1} = R \ln \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} = 700.5 \text{ K} = 427 \text{ }^\circ\text{C}$$

Sostituito il valore appena trovato nell'espressione del rendimento si ottiene

$$\eta_c = 0.76$$

La variazione di entropia della trasformazione reale vale:

$$\Delta s_{21} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 1041.6 \ln \frac{823.15}{293.15} - 296.8 \ln \frac{20}{1} = 166 \text{ J/kg K} \neq 0$$

**Esercizio 4.8** (Soluzione redatta dallo studente Andrea Cosentino)

Per la soluzione del problema consideriamo l'azoto un gas ideale con  $R = 296.8 \text{ J/kg K}$  e con  $k = 1.41$  e sfruttiamo le proprietà dei gas ideali.

Prima di tutto ci calcoliamo il rapporto di compressione:

$$r_p = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = \sqrt{20} = 4.472$$

Si calcola la potenza assorbita tramite la seguente relazione ()

$$l_{12} = N c_p T_1 (1 - (r_p)^a)$$

$$a = \frac{R}{c_p}$$

$$c_p = \frac{kR}{k - 1}$$

Sostituendo i valori numerici otteniamo:

$$l'_{12} = -325.9 \text{ kJ/kg}$$

$$W'_m = -130 \text{ kW}$$

La temperatura di uscita dell'azoto si calcola sfruttando la legge dell'adiabatica reversibile (isoentropica) per un gas ideale

$$c_p \frac{dT}{T} = R \frac{dp}{p}$$

da cui, se  $c_p = \text{costante}$ , riferendo di nuovo  $r_p$  al singolo stadio:

$$\frac{T_2}{T_1} = (r_p)^{R/c_p}$$

Sostituendo i valori numerici, si ottiene una temperatura di uscita pari a:

$$T_2 = 293.15 \cdot 4.472^{0.286} = 452 \text{ K} = 179.5^\circ\text{C}$$

Tale temperatura si ritrova all'uscita sia del primo che del secondo stadio.

**Esercizio 4.10** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Si tratta di un normale scambiatore di calore a superficie.

Il bilancio di energia risulta:

$$G_1(h_{1i} - h_{1u}) = G_2(h_{2u} - h_{2i})$$

Siccome il gas ha un comportamento ideale e l'acqua è assimilabile ad un fluido incompressibile posso scrivere:

$$G_1 c_{p1}(T_{1i} - T_{1u}) = G_2 c_{p2}(T_{2u} - T_{2i})$$

La temperatura cercata si ottiene facilmente

$$T_{1u} = T_{1i} - \frac{G_2 c_{p2}}{G_1 c_{p1}}(T_{2u} - T_{2i}) = 440^\circ\text{C}$$

**Esercizio 4.11** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]	$x$
1	160	570	3492.28	6.546	-
2i	1	99.66	2372.28	6.546	0.8657
2	1	99.66	2652.28	7.300	0.99

Il titolo in uscita e la potenza meccanica nel caso di espansione adiabatica e reversibile (e quindi isoentropica) si calcola così:

$$x = \frac{s_{2i} - s_f}{s_g - s_f} = \frac{6.546 - 1.303}{7.360 - 1.303} = 0.8657$$

$$W'_{ml} = G(h_1 - h_{2i}) = 1.5(3492.28 - 2372.28) = 1.68 \text{ MW}$$

Se il rendimento isoentropico della turbina è  $\eta_t = 0.75$ , la potenza meccanica da essa erogata vale:

$$W'_{mR} = \eta_t \cdot W'_{ml} = 0.75 \cdot 1.68 = 1.26 \text{ MW}$$

Il valore dell'entalpia reale dopo l'espansione si calcola con l'espressione del rendimento:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2i}} \Rightarrow h_2 = h_1 - \eta_t (h_1 - h_{2i}) = 2652.28 \text{ kJ/kg}$$

Il titolo in uscita nel caso reale si calcola una volta trovati dalle tabelle l'entalpia del liquido saturo ( $h_f$ ) e l'entalpia del vapore saturo secco ( $h_g$ ) corrispondenti alla pressione di 1 bar:

$$x = \frac{h_2 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{2652.28 - 417.58}{2675.53 - 417.58} = 0.99$$

La variazione di entropia (nulla nel caso ideale) vale ora:

$$\Delta s = 7.300 - 6.546 = 0.75 \text{ kJ/kg K}$$

**Esercizio 4.12** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$c$ [m/s]
3	8	850	10
4	1.1		50

Ricaviamo preliminarmente il valore di  $T_4$ : per fare ciò sfruttiamo la condizione di isoentropicità ( $ds=0$ ).

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} = 0$$

Da cui deriva

$$c_p \ln \frac{T_4}{T_3} = R \ln \frac{p_4}{p_3} \Rightarrow T_4 = T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{R}{c_p}}$$

Il valore di  $R$  si può calcolare:

$$c_p = \frac{Rk}{k-1} \Rightarrow R = c_p \frac{k-1}{k} = 275.41 \text{ J/kg K}$$

Il valore della temperatura è quindi:

$$T_4 = 413 \text{ °C}$$

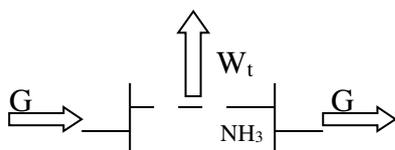
Il lavoro ottenuto per ogni kg di gas si ottiene dal bilancio energetico del sistema:

$$-W'_m + G(h_1 - h_2 + e_{c1} - e_{c2}) = 0$$

$$l' = \frac{W'_m}{G} = (h_1 - h_2) + (e_{c1} - e_{c2}) = c_p (T_1 - T_2) + \left( \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} \right) = 482 \text{ kJ/kg}$$

**Esercizio 4.13** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Consideriamo inizialmente come sistema solo metà dello scambiatore a superficie, ed in particolare la metà attraversata dall'ammoniaca.

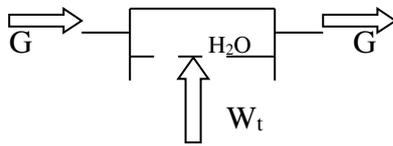


	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]	$x$
1	14	36.25	1328.34	4.422	0.9
2	10	20	245.1	0.917	-

Facendo il bilancio energetico del nostro sistema ridotto si ottiene:

$$W_t = G(h_2 - h_1) = -2.17 \text{ MW}$$

Dove il segno meno è congruente alla convenzione da noi adottata che vuole negativa la potenza termica ceduta dal sistema all'esterno (in questo caso alla seconda metà del sistema).  
 Rappresento il ora il lato secondario dello scambiatore (e cioè la sopraccitata seconda metà del sistema, quella attraversata dall'acqua):



Faccio il bilancio energetico di questo sistema parziale, ricordando che l'acqua può essere considerata un fluido incomprimibile:

$$W_t + G(h_1 - h_2) = 0$$

$$G = \frac{W_t}{(h_2 - h_1)} = \frac{W_t}{c(T_2 - T_1)} = \frac{2.17 \cdot 10^6}{4187 \cdot 5} = 104 \text{ kg/s}$$

**Esercizio 4.14** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]	$x$
1	10	311.09	2724.86	5.614	1
2	10	311.09	2704.86	5.580	0.985

Calcolo prima di tutto la superficie della tubazione interessata allo scambio termico: siccome lo spessore è piccolo rispetto al diametro, considero la superficie laterale esterna del cilindro  $A_{lat}$ :

$$A_{lat} = D_e \pi \cdot L = 89 \cdot 10^{-3} \cdot 3.14 \cdot 50 = 14 \text{ m}^2$$

Le perdite di calore sono date dalla seguente formula:

$$Q = u \cdot A_{lat} \cdot \Delta T = 20 \cdot 14 \cdot (311.09 - 20) = 80 \text{ kW}$$

La tubazione si può considerare come uno scambiatore di calore a superficie che scambia una potenza termica  $W_t$  pari a  $-Q$  (negativa in quanto ceduta all'esterno)

Scrivo l'equazione di bilancio energetico:

$$W_t + G(h_1 - h_2) = 0$$

$$h_2 = h_1 + \frac{W_t}{G} = h_1 - \frac{Q}{G} = 2704.86$$

Il titolo si ricava una volta ricavati dalle tabelle i valori dell'entalpia del liquido saturo ( $h_f$ ) e l'entalpia del vapore saturo secco ( $h_g$ ) corrispondenti alla pressione di 10 bar:

$$x = \frac{h_2 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{2704.86 - 1407.69}{2724.86 - 1407.69} = 0.985$$

**Esercizio 4.15** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]	$x$
3	40	431	3285.89	6.8876	-
4	0.05	32.92	2319.17	7.6032	0.90
4i	0.05	32.92	2101.05	6.8876	0.81

In seguito all'espansione non si è ottenuto il massimo lavoro possibile perché questo avviene in caso di trasformazioni isoentropiche ( $\Delta s = 0$ ); il nostro caso invece presenta un incremento di entropia ( $\Delta s \neq 0$ ).

Il rendimento è dato dall'espressione:

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4i}} = \frac{3285.89 - 2319.17}{3285.89 - 2101.05} = 0.82$$

#### Esercizio 4.16

a) Essendo la trasformazione isoentropica abbiamo che, nell'ipotesi di velocità e quota rispettivamente uguali tra monte e valle:

$$-l'_{id} = \int_1^2 v dp = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

$$p_1 = p_{vs}(27^\circ C) = 0.0360 \quad \text{bar}$$

$$l'_{id} = - \frac{7,00 \cdot 10^{-6} - 0,0360 \cdot 10^5}{1,00 \cdot 10^3} = -7.00 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$|W'_{m,id}| = G \cdot |l'_{id}| = 0.50 \cdot (7.00 \cdot 10^3) = 3.50 \text{ kW}$$

Notare che per un fluido incomprimibile, essendo  $ds=c \, dT/T$ , la variazione di temperatura è nulla in una trasformazione isoentropica.

b) La potenza reale è data da

$$|W'_{m,R}| = |W'_{m,id}| / \eta_p = 3.50 \cdot 10^3 / 0.6 = 5.83 \text{ kW}$$

Il bilancio di energia sulla pompa è dato da:

$$W'_{m,R} = G(h_1 - h_{2R})$$

quindi

$$-l'_R = - \frac{W'_{m,R}}{G} = h_{2R} - h_1 = c \cdot (T_{2R} - T_1) + v \cdot (p_2 - p_1) = c \cdot (T_{2R} - T_1) - l'_{id}$$

$$T_{2R} - T_1 = \frac{-l'_R + l'_{id}}{c} = \frac{-l'_R \cdot (1 - \eta_p)}{c} = 1.1 \text{ K}$$

La equazione precedente mostra chiaramente che il lavoro in eccesso rispetto a quello ideale si traduce in riscaldamento del fluido. E' facile verificare che in questo caso il processo è irreversibile, essendo il sistema adiabatico e

$$\Delta s = c \ln \left( \frac{T_{2R}}{T_1} \right) > 0$$

#### Esercizio 4.17 (Soluzione redatta dallo studente Renato Lison)

Si parte dall'equazione di bilancio dell'energia nella sua forma più generale:

$$\frac{d(U + E_c + E_p)}{dt} = W_t - W_m + \sum_i G_i(u_i + e_{ci} + e_{pi}) - \sum_u G_u(u_u + e_{cu} + e_{pu})$$

e la si specializza in base alle circostanze. Essendo le pareti della caldaia rigide la potenza meccanica utile raccolta è nulla. Dato che si tratta di un caso stazionario, il primo termine è

nullo. Si suppone infine di poter trascurare le variazioni di energia cinetica e potenziale, e si ottiene

$$0 = W_T - 0 + \sum_e G_e h_e - \sum_u G_u h_u$$

e poiché si tratta di un sistema aperto a regime con un solo ingresso ed una sola uscita, dal bilancio di massa si ha

$$G_e = G_u = G$$

e quindi

$$W_T = G(h_u - h_e)$$

dal programma di calcolo CATT si ha

$$h_u (p = 2 \text{ MPa} ; x = 1) = 2799,515 \text{ kJ/kg}$$

$$h_e (p = 2 \text{ MPa} ; T = 20 \text{ °C}) = 85,821 \text{ kJ/kg}$$

da cui infine (tenuto conto che la portata va convertita in kg/s)

$$W_T = G(h_u - h_e) = \frac{50000}{3600} (2799,15 - 85,821) = 37,69 \text{ MW}$$

#### Esercizio 4.18 (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

Considerando il sistema aperto e a regime, il bilancio di energia nel compressore porge (la seconda uguaglianza è verificata solo per un gas ideale con calore specifico costante):

$$l' = -(h_2 - h_1) = -c_p (T_2 - T_1)$$

il lavoro di compressione può essere calcolato a partire dal lavoro isoentropico, che a sua volta è noto una volta nota la temperatura finale della compressione reversibile.

Per una trasformazione adiabatica e reversibile (quindi isoentropica), denotando con il pedice  $2i$  lo stato finale

$$\frac{T_{2i}}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{T_{2i}}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 289 \cdot (4,00)^{0,4/1,4} = 429 \text{ K}$$

dalla definizione di rendimento isoentropico si ottengono la temperatura di uscita ed il lavoro reali

$$\eta_c = \frac{(h_{2i} - h_1)}{(h_{2R} - h_1)} = \frac{c_p \cdot (T_{2i} - T_1)}{c_p \cdot (T_{2R} - T_1)} = \frac{(T_{2i} - T_1)}{(T_{2R} - T_1)}$$

da cui

$$T_{2R} = T_1 + \frac{1}{\eta_c} (T_{2i} - T_1) = 289 + \frac{1}{0,650} \cdot (429 - 289) = 505 \text{ K}$$

Una volta nota  $T_{2R}$ , il lavoro reale è ottenibile anche direttamente dal bilancio di energia

$$l' = -c_p \cdot (T_{2R} - T_1) = -1,01 \cdot (505 - 289) = -218 \text{ kJ/kg}$$

La potenza di compressione è infine data da

$$|W_m| = G |l'| = 0,03 \cdot 218 = 6,55 \text{ kW}$$

#### Esercizio 4.19 (Soluzione redatta dallo studente Fabrizio Leverone)

Bisogna innanzitutto convertire la portata volumetrica in unità SI

$$G_{V1} = 50 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 50 \frac{\text{m}^3}{3600 \text{ s}} = 0,0139 \text{ m}^3/\text{s}$$

La portata massica (che rimane costante) è data da

$$G = \frac{G_{V1}}{v_1} = G_{V1} \cdot \frac{p_1}{RT_1} = 0.0139 \frac{100000}{296.8 \cdot 293.15} = 0.016 \text{ kg/s}$$

La pressione intermedia ottimale si ricava dalla radice quadrata del prodotto delle pressioni iniziale e finale:

$$p_i = \sqrt{p_1 p_2} = 249 \text{ kPa}$$

La potenza di compressione è data dalla somma dei contributi delle due trasformazioni adiabatiche (si ha quindi  $N=2$  nella formula seguente):

$$W_c = G \cdot l'_{ad2} = -G \cdot \frac{NRk}{k-1} T_1 \left( r_p^{\frac{k-1}{N}} - 1 \right) = -0.016 \cdot \frac{2 \cdot 296.8 \cdot 1.40}{0.4} 293.15 \left( 6.2^{\frac{0.4}{1.4 \cdot 2}} - 1 \right) = -2.90 \text{ kW}$$

Dato che il rigeneratore riporta la temperatura al valore iniziale, per ottenere la temperatura finale basta calcolarla tenendo conto solo dell'ultima trasformazione adiabatica la quale avviene sempre con temperatura iniziale di 20 °C ma con rapporto di compressione  $r_{p2} = r_{p1} = p_2/p_i \approx 2,5$ :

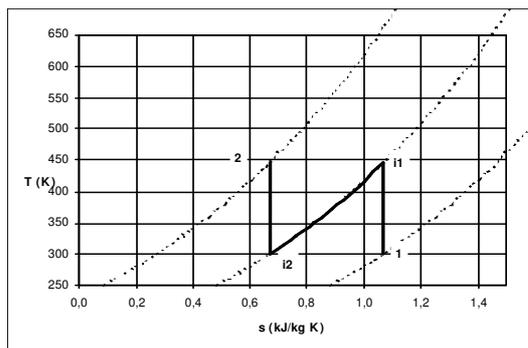
$$T_2 = T_1 \sqrt[k]{r_{p2}^{k-1}} = 293.15 \sqrt[1.4]{2.5^{0.4}} = 380 \text{ K}$$

La potenza scambiata con l'ambiente è dovuta solo alla trasformazione isobara di raffreddamento. Per altro, il calore scambiato in questa fase è uguale al lavoro compiuto sul gas nel primo stadio di compressione

$$W_t = G \cdot l'_{ad1} = -G \cdot \frac{Rk}{k-1} T_1 \left( r_{p1}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = -1.44 \text{ kW}$$

Per la portata volumetrica in uscita basta il volume specifico con i nuovi dati:

$$G_{V2} = G \cdot v_2 = G \cdot \frac{RT_2}{p_2} = 10.3 \text{ m}^3/\text{h}$$



**Nota:** l'allievo può verificare che la potenza di compressione è ottenibile anche mediante l'espressione

$$W_c = -NG \cdot c_p (T_2 - T_1)$$

**Esercizio 4.20** (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

Facendo uso delle tabelle dell'acqua, si valutano dapprima le condizioni finali per una espansione ideale (isoentropica)

Stato 1:  $h_1 = 4020 \text{ kJ/kg}$   $s_1 = 7.67 \text{ kJ/kg K}$

Stato 2i:  $p_2 = 4.5 \text{ bar}$   $s_{2i} = s_1$   $h_{2i} = 3180 \text{ kJ/kg}$

Lo stato finale nella espansione reale può essere valutato utilizzando l'espressione del rendimento isoentropico

$$\eta_r = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} = 0.85$$

$$h_2 = h_1 + \eta_r \cdot (h_{2i} - h_1) = 4020 + 0.85 \cdot (3180 - 4020) = 3.31 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$$

Dal bilancio di energia sulla turbina (sistema adiabatico, aperto ed a regime) si ottiene il lavoro erogato e quindi la potenza

$$l' = (h_1 - h_2) = 4020 - 3310 = 710 \text{ kJ/kg}$$

$$W_m = G l' = 0.2 \cdot 710 = 142 \text{ kW}$$

Conoscendo l'entalpia della corrente in uscita e la pressione si ha infine:

$$\text{Stato 2: } T_2 = 418 \text{ °C} \quad s_2 = 7.90 \text{ kJ/kg K}$$

### Esercizio 4.21 (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

I bilanci di energia e di entropia nello scambiatore sono:

$$G_w \cdot h_1 + G_R \cdot h_3 = G_w \cdot h_2 + G_R \cdot h_4$$

$$G_w \cdot s_1 + G_R \cdot s_3 + \dot{S}_{irr} = G_w \cdot s_2 + G_R \cdot s_4$$

$$\text{Stato 3: vapore surriscaldato: } h_3 = 457.1 \text{ kJ/kg} \quad s_3 = 1.803 \text{ kJ/kg K}$$

$$\text{Stato 4: liquido saturo: } h_4 = 274.5 \text{ kJ/kg} \quad s_4 = 1.246 \text{ kJ/kg K}$$

a) Dal bilancio di energia

$$G_w = \frac{G_R \cdot (h_3 - h_4)}{c \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{5.0 \cdot (457.1 - 274.5)}{60 \cdot 4.187 \cdot (25 - 15)} = 0.363 \text{ kg/s}$$

b) Dal bilancio di entropia

$$\begin{aligned} \dot{S}_{irr} &= G_w \cdot (s_2 - s_1) + G_R \cdot (s_4 - s_3) = G_w \cdot c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + G_R \cdot (s_4 - s_3) = \\ &= 0.363 \cdot 4.187 \cdot \ln \frac{298}{288} + \frac{5.0}{60} \cdot (1.246 - 1.803) = 5.46 \text{ W/K} \end{aligned}$$

Si nota che, come prevedibile, vi è generazione di entropia: lo scambio termico con differenze finite di temperatura è un fenomeno irreversibile.

### Esercizio 4.22 (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

Bilancio di energia sullo scambiatore

$$G_R \cdot h_1 + G_a \cdot h_3 = G_R \cdot h_2 + G_a \cdot h_4$$

$$p_1 = 10 \text{ bar}, \quad T_1 = 60^\circ \text{C} \Rightarrow h_1 = 441.3 \text{ kJ/kg} \quad s_1 = 1.781 \text{ kJ/kg K}$$

$$p_2 = 10 \text{ bar}, \quad x_2 = 0 \Rightarrow h_2 = 255.4 \text{ kJ/kg} \quad s_2 = 1.188 \text{ kJ/kg K} \quad T_2 = 39.4^\circ \text{C}$$

$$G_a \cdot (h_3 - h_4) = G_R \cdot (h_2 - h_1)$$

$$G_a \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4) = G_R \cdot (h_2 - h_1)$$

$$T_4 = T_3 - \frac{G_R}{G_a \cdot c_p} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$T_4 = 60 - \frac{10}{80 \cdot 1.01} \cdot (255.3 - 441.3) = 83^\circ\text{C}$$

Notare che, dato che nelle formule risolutive compare solo il rapporto delle portate, non è necessario riportare le medesime in unità SI.

Il bilancio entropico dello scambiatore è

$$G_R \cdot s_1 + G_a \cdot s_3 + \dot{S}_{irr} = G_R \cdot s_2 + G_a \cdot s_4$$

quindi

$$\begin{aligned} \dot{S}_{irr} &= G_R \cdot (s_2 - s_1) + G_a \cdot (s_4 - s_3) = G_R \cdot (s_2 - s_1) + G_a \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = \\ &= \frac{10}{60} \cdot (1.188 - 1.781) + \frac{80}{60} \cdot 1.01 \cdot \ln \frac{356.15}{333.15} = -0.0988 + 0.0899 = -0.0089 \text{ kW/K} \end{aligned}$$

quindi lo scambiatore, pur non violando il primo principio della T.D., non è in grado di funzionare perché viola il secondo principio. Del resto, sarebbe sorprendente se l'R134a, condensando, cedesse *spontaneamente* del calore a una corrente di acqua a temperatura superiore ... una circostanza di cui il primo principio non tiene assolutamente conto.

## Capitolo 5

Le soluzioni degli esercizi 5.1-5.12 sono state redatte dallo studente Giacomo Garofalo

### Esercizio 5.1

Dati:

$$\mu = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\bar{w} = 4 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$$

$$D_H = 2.6 \text{ m}$$

Il numero di Reynolds si calcola:

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_H}{\mu} = \frac{1030 \cdot 4 \cdot 2.6}{1.1 \cdot 10^{-3}} = 9.74 \cdot 10^6$$

### Esercizio 5.2

$$D = 100 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$s = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\bar{w} = 2.4 \text{ m/s}$$

Per l'acqua a 21°C si hanno i seguenti valori:

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.978 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

Il diametro idraulico si ottiene dalla definizione

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

Dove  $A$  è l'area della corona circolare di raggio interno  $r=25\text{mm}$  e raggio esterno  $R=48\text{mm}$  (questo valore del raggio esterno si ottiene sottraendo lo spessore  $s$  alla metà del diametro  $D$ );  $P$  è la somma del perimetro interno (di raggio  $r$ ) e del perimetro esterno (di raggio  $R$ ):

$$D_H = 4 \frac{R^2\pi - r^2\pi}{2R\pi + 2r\pi} = 46 \text{ mm}$$

Il numero di Reynolds si calcola:

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_H}{\mu} = \frac{997 \cdot 2.4 \cdot 46 \cdot 10^{-3}}{0.978 \cdot 10^{-3}} = 112.5 \cdot 10^3$$

### Esercizio 5.3

Dati:

$$\mu = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\rho = 0.83 \text{ kg/m}^3$$

$$L = 120 \text{ m}$$

$$\text{rugosità relativa} = \frac{\text{rugosità media}}{\text{diametro idraulico}} = \frac{\varepsilon}{D_H} = 2 \cdot 10^{-6}$$

Dalla portata in volume ricavo il valore del diametro idraulico (e siccome il camino è circolare, il suo diametro è proprio il diametro idraulico):

$$Q = A\bar{w} = \frac{D_H^2}{4} \pi \bar{w}$$

Da cui si ricava:

$$D_H = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \bar{w}}} = 6.18 \text{ m}$$

Le perdite distribuite si calcolano con la seguente relazione:

$$h_{a,d} = \lambda (Re, \varepsilon/D_H) \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g}$$

Dato che il coefficiente di Darcy  $\lambda$  è funzione anche del numero di Reynolds oltre che della rugosità relativa  $\varepsilon$ , lo calcoliamo:

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_H}{\mu} = 2.05 \cdot 10^6$$

Dato che il numero di Reynolds è maggiore di 10000, il moto del fluido è turbolento; per calcolare il coefficiente di Darcy  $\lambda$ , usiamo l'espressione di Haaland:

$$\lambda = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D_H} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{2.05 \cdot 10^6} + \left( \frac{1}{3.7} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} = 0.010$$

Ora che siamo in possesso di tutti i dati necessari, applichiamo la relazione precedentemente scritta:

$$h_{a,d} = \lambda (Re, \varepsilon/D_H) \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g} = 0.010 \frac{120}{2 \cdot 10^{-6}} \frac{10^2}{2 \cdot 9.8} = 1.03 \text{ m}$$

#### Esercizio 5.4

L'equazione generalizzata di Bernoulli è:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

Non essendoci variazioni di velocità e quota, i termini  $d\bar{w}^2$  e  $dz$  sono rispettivamente nulli. La prevalenza della pompa  $dh'$  è anch'essa nulla dato che nel nostro sistema non è presente una pompa.

L'equazione di Bernoulli si riscrive così:

$$\frac{dp}{\gamma} = -dh_a$$

Da cui si ricava:

$$dp = -\gamma \cdot dh_a$$

$$\Delta p = -\gamma \cdot h_a$$

Ricordando che

$$h_a = h_{a,d} = \lambda (Re, \varepsilon/D_H) \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g}$$

Bisogna, per prima cosa, calcolare il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_H}{\mu} = \frac{900 \cdot 0.5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{2} = 4.5$$

Il moto è laminare; per trovare il coefficiente di Darcy posso usare la seguente relazione

$\lambda = \frac{c}{Re}$ , sapendo che per condotti a sezione circolare vale sempre  $c=64$ .

$$\lambda = \frac{c}{Re} = \frac{64}{4.5} = 14.2$$

Da cui si ricava

$$h_{a,d} = 36.26 \text{ m}$$

$$\Delta p = -\gamma \cdot h_a = -\rho g \cdot h_a = -9.8 \cdot 900 \cdot 36.26 = -320 \text{ kPa}$$

Il segno meno mi conferma che c'è una caduta di pressione tra ingresso ed uscita del tubo, com'è logico attendersi dato che non ci sono né pompe né dislivelli che possano "aiutare" il fluido a percorrere il condotto.

Il moto di un fluido cessa di essere laminare quando il numero di Reynolds supera il valore di 2000: è da questo valore infatti che si entra nella zona di transizione laminare-turbolenta. Basta sostituire questo valore nell'espressione del numero di Reynolds e ricavare da questa la velocità:

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_H}{\mu} \Rightarrow \bar{w} = \frac{\mu Re}{\rho D_H} = \frac{2 \cdot 2000}{900 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 222 \text{ m/s}$$

### Esercizio 5.5

Sostituiamo il numero di Reynolds nell'espressione di Blasius:

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_H}{\mu}$$

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}} = \frac{0.316 \cdot \mu^{0.25}}{\rho^{0.25} \bar{w}^{0.25} D_H^{0.25}}$$

Sostituiamo a sua volta il coefficiente di Darcy appena calcolato nell'espressione delle perdite di carico distribuite:

$$h_{a,d} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g} = \frac{0.316 \mu^{0.25} L \bar{w}^2}{\rho^{0.25} \bar{w}^{0.25} D_H^{0.25} D_H 2g} = \frac{0.316 \mu^{0.25} L \bar{w}^{1.75}}{\rho^{0.25} 2g} \cdot \frac{1}{D_H^{1.25}}$$

Siccome vale:

$$G = A \bar{w} \rho = \frac{D_H^2}{4} \pi \bar{w} \rho \Rightarrow \bar{w} = \frac{4G}{D_H^2 \pi \rho}$$

Sostituisco quindi il valore della velocità trovato nell'espressione delle perdite di carico distribuite precedente, e ottengo:

$$h_{a,d} = \frac{0.316 \mu^{0.25} 4^{1.75} L G^{1.75}}{D_H^{3.5} \pi^{1.75} \rho^{1.75} \rho^{0.25} 2g} \cdot \frac{1}{D_H^{1.25}} = K \frac{1}{D_H^{4.75}}$$

**Esercizio 5.6**

$$D = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = 0,02$$

$L = 32 \text{ m}$  lunghezza della tubazione

$H = z_1 - z_2 = 34 \text{ m}$  differenza di quota

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

Facciamo i seguenti assunti:

- La variazione di pressione  $dp$  è nulla dato che la pressione nel serbatoio è quella atmosferica (il serbatoio è aperto) e la pressione all'uscita della tubazione è anch'essa quella atmosferica (visto che la tubazione è aperta verso l'ambiente);
- La variazione di velocità  $d\bar{w}$  è non nulla: il fluido si trova in quiete nel serbatoio ma esce con una certa velocità dalla tubazione;
- C'è una differenza di quota  $dz$  tra ingresso e uscita;
- Nel nostro sistema non sono presenti pompe, per cui la prevalenza  $dh'$  è nulla;
- Le perdite di carico  $dh_a$  non sono trascurabili.

L'equazione di Bernoulli si semplifica ed integra nel seguente modo, considerando che la velocità del fluido nella sezione 1 è trascurabile:

$$\frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = -dh_a$$

$$+ \frac{\alpha}{2g} (w_2^2) + (z_1 - z_2) = -h_a \quad \rightarrow \quad + \frac{\alpha}{2g} (w_2^2) + h_a = z_2 - z_1 = H$$

Le perdite di carico sono:

$$h_a = h_{a,d} + h_{a,c} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{w^2}{2g} + 1 \cdot \frac{w^2}{2g} = \frac{w^2}{2g} \left( \frac{\lambda L}{D_H} + 1 \right)$$

in cui abbiamo considerato le perdite di carico concentrate dovute unicamente all'imbocco del serbatoio ( $K=1$ ).

Sostituendo il valore della perdite trovato nell'equazione di Bernoulli semplificata (e manipolando un po'), si ottiene:

$$\frac{\alpha}{2g} w_2^2 + \frac{w_2^2}{2g} \left( \frac{\lambda L}{D_H} + 1 \right) = H$$

$$\frac{w_2^2}{2g} \left( \frac{\lambda L}{D_H} + 1 + \alpha \right) = H$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{2gH}{\frac{\lambda L}{D_H} + 1 + \alpha}} = 4,4 \text{ m/s} \quad \text{dove } \alpha=1,06 \text{ per moto turbolento (da verificare a posteriori)}$$

$$G = A w \rho = \frac{D^2}{4} \pi w \rho = 1,36 \text{ kg/s}$$

L'assunzione fatta che il moto sia turbolento è verificabile una volta ricavata la velocità del fluido; infatti si verifica facilmente che il numero di Reynolds vale circa  $Re = 88000$ .

### Esercizio 5.7

Dati:

$$Q = 10 \text{ L/s} = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\mu = 82 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho = 918 \text{ kg/m}^3$$

$$L = 30 \text{ m}$$

$$\Delta p = 30 \text{ kPa}$$

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

Non essendoci pompe ( $dh'$ ), dislivelli ( $dz$ ) o variazioni di velocità ( $dw$ ), l'equazione di Bernoulli si semplifica così:

$$\frac{dp}{\gamma} = -dh_a$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = h_a$$

Le perdite sono in questo caso solo distribuite:

$$h_a = h_{a,d} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{w^2}{2g}$$

Supponendo il moto laminare, il coefficiente di Darcy ha la seguente espressione:

$$\lambda = \frac{c}{Re}$$

Per condotti a sezione circolare  $c=64$ . Sostituisco inoltre l'espressione del numero di Reynolds ottenendo:

$$\lambda = 64 \frac{\mu}{\rho w D_H}$$

Posso quindi scrivere:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = h_a = 64 \frac{\mu}{\rho w D_H} \frac{L w^2}{D_H 2g}$$

Ricordando che

$$Q = Aw \Rightarrow w = \frac{Q}{A} = \frac{Q4}{D_H^2 \pi}$$

Sostituisco il valore della velocità  $w$  così trovato nell'espressione della perdita di carico  $h_a$  e proseguo:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{64 \mu L Q 4}{2g \rho D_H^2 D_H^2 \pi} = \frac{128 \mu L Q}{\rho g \pi D_H^4}$$

Da cui si ottiene il valore del diametro idraulico cercato:

$$D_H = \sqrt[4]{\frac{128 \mu L Q \rho g}{\rho g \pi \Delta p}} = \sqrt[4]{\frac{128 \mu L Q}{\pi \Delta p}} = 75 \text{ mm}$$

Bisogna verificare l'ipotesi iniziale, ossia che il moto del fluido sia laminare. Per fare ciò calcoliamo preliminarmente la velocità  $w$  che si ottiene in corrispondenza del diametro appena trovato:

$$w = \frac{4Q}{D_H^2 \pi} = 2,21 \text{ m/s}$$

In condizioni di moto laminare, il numero di Reynolds deve essere minore di 2000:

$$Re = \frac{\rho w D_H}{\mu} = 1880 < 2000$$

L'ipotesi è quindi verificata.

### Esercizio 5.8

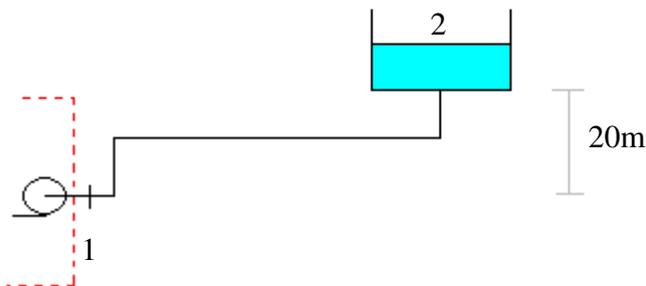
Trasformiamo le unità di misura della portata volumetrica in quelle del Sistema Internazionale:

$$G_V = 185 \text{ m}^3/\text{h} = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dalla portata volumetrica ricaviamo il valore della velocità  $w$ :

$$G_V = Aw \Rightarrow w = \frac{G_V}{A} = \frac{4G_V}{D^2 \pi}$$

Lo schema dell'impianto è il seguente:



Il sistema che prendiamo in considerazione è quello *a valle* della pompa, ossia quello rappresentato nello schema ma pompa esclusa. Tralasciamo la pompa perché il problema non ci fornisce dati su di essa mentre conosciamo i valori di pressione (9 bar) e velocità ( $w$ ) immediatamente al di fuori di questa.

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

L'unico termine che si può elidere è proprio la prevalenza della pompa  $dh'$ , visto che la pompa è esterna al sistema e quindi non la consideriamo.

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = -dh_a$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} w_1^2 = z_2 - h_a$$

Le perdite di carico  $h_a$  sono date dalla somma delle perdite distribuite  $h_{a,d}$  e concentrate  $h_{a,c}$ .

Le perdite di carico distribuite  $h_{a,d}$  si calcolano con la solita espressione nella quale bisogna sostituire alla velocità  $w$ , il valore calcolato all'inizio, funzione della portata volumetrica.

$$h_{a,d} = \lambda (Re, \varepsilon/D_H) \frac{L}{D_H} \frac{w^2}{2g} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{8G_V^2}{D_H^4 \pi^2 g} = \frac{8L\lambda G_V^2}{\pi^2 g D_H^5} = K_1 \frac{1}{D_H^5}$$

Analogo discorso per le perdite di carico concentrate  $h_{a,c}$ :

$$h_{a,c} = \sum K_i \frac{w_i^2}{2g} = (3 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) \frac{w^2}{2g} = \frac{2,5 \cdot 16G_V^2}{2gD_H^4 \pi^2} = \frac{20G_V^2}{\pi^2 g} \frac{1}{D_H^4} = K_2 \frac{1}{D_H^4}$$

Ora esprimiamo il termine  $\frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2$  dell'equazione di Bernoulli, in funzione della portata

volumetrica, con l'espressione  $w = \frac{4G_V}{D^2 \pi}$ :

$$\frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 = \frac{16\alpha G_V^2}{2gD_H^4 \pi^2} = \frac{8\alpha G_V^2}{\pi^2 g} \frac{1}{D_H^4} = K_3 \frac{1}{D_H^4}$$

L'equazione di Bernoulli diventa quindi:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} + K_3 \frac{1}{D_H^4} = z_2 + K_1 \frac{1}{D_H^5} + K_2 \frac{1}{D_H^4}$$

Svolgendo i calcoli, si verifica che i termini in  $K_2$  e  $K_3$  sono trascurabili rispetto a quello in  $K_1$ , in quanto inferiori di un ordine di grandezza. Riscrivo la precedente relazione semplificandola:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = z_2 + K_1 \frac{1}{D_H^5}$$

Da cui si ricava il valore del diametro richiesto:

$$D_H^5 \left( \frac{\Delta p}{\gamma} - z_2 \right) = K_1$$

$$D_H^5 = \frac{\gamma K_1}{\Delta p - \gamma z_2}$$

$$D_H = \sqrt[5]{\frac{8\lambda \rho L G_V^2}{\pi^2 (\Delta p - \gamma z_2)}} = 0,13 \text{ m}$$

Controllo quindi che l'ipotesi  $\lambda = 0,04$  sia ragionevole, calcolando il valore del coefficiente di Darcy con la relazione di Haaland:

$$w = \frac{4G_V}{D_H^2 \pi} = 3,84 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho w D_H}{\mu} = 5116,8$$

Assumendo per la rugosità relativa ( $\epsilon/D_H$ ) un valore di 0,005, si ottiene

$$\lambda = \left\{ -0,782 \ln \left[ \frac{6,9}{Re} + \left( \frac{\epsilon}{3,7 D_H} \right)^{1,11} \right] \right\}^{-2} = \left\{ -0,782 \ln \left[ \frac{6,9}{5116,8} + \left( \frac{1}{3,7} \cdot 0,005 \right)^{1,11} \right] \right\}^{-2} = 0,042$$

L'ipotesi è quindi verificata.

### Esercizio 5.9

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

La precedente si può semplificare perché:

- $dp=0$ , in quanto il fluido nei serbatoi (aperti) si trova a pressione atmosferica;
- $dw=0$ , in quanto, in entrambi i serbatoi, il fluido si trova in condizioni di quiete;
- $dh'=0$ , in quanto nel sistema non è presente alcuna pompa.

L'equazione di Bernoulli si può quindi riscrivere:

$$dz = -dh_a$$

$$z = h_{a,d}$$

$$z = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{w^2}{2g}$$

La velocità del fluido  $w$  si può esprimere in funzione della portata volumetrica  $G_V$ :

$$G_V = Aw = \frac{D_H^2}{4} \pi w \Rightarrow w = \frac{4G_V}{D_H^2 \pi}$$

Si ricava quindi:

$$z = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{16G_V^2}{2gD_H^4 \pi^2}$$

$$G_V = \sqrt{\frac{gz\pi^2 D_H^5}{8\lambda L}} = 0,49 \text{ m}^3/\text{s}$$

Per determinare la potenza di pompaggio (e quindi la prevalenza della pompa  $dh'$ ) riscriviamo l'equazione di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

Per i motivi già spiegati in precedenza, consideriamo nulli  $dp$  e  $dw$ . Naturalmente  $dh'$  non viene più semplificata dato che è l'incognita da calcolare.

$$dz = dh' - dh_a$$

$$\text{caso b : } h' = h_{a,d} - z$$

$$\text{caso c : } h' = h_{a,d} + z$$

Le perdite di carico distribuite valgono:

$$h_{a,d} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g} = \frac{8\lambda L G_V^2}{g\pi^2 D_H^5} = 74.86 \text{ m}$$

Si ottiene

$$\text{caso b : } h' = h_{a,d} - z = 74.86 - 45 = 29.87 \text{ m}$$

$$\text{caso c : } h' = h_{a,d} + z = 74.86 + 45 = 119.87 \text{ m}$$

Il valore del coefficiente di Darcy si trova con il diagramma di Moody, o analogamente, con la relazione di Haaland:

$$w = \frac{4G_V}{D_H^2 \pi} = 2.21 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho w D_H}{\mu} = 1.47 \cdot 10^6$$

$$\lambda = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D_H} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{1.47 \cdot 10^6} + \left( \frac{900 \cdot 10^{-6}}{3.7 \cdot 0.6} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} = 0.022$$

### Esercizio 5.10

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

- Non c'è motivo per cui ci debbano essere cadute di pressione: il sistema che studiamo è semplicemente un condotto aperto alle due estremità:  $dp=0$ ;
- Non ci sono variazioni di velocità per cui è  $dw=0$ ;
- Il condotto è orizzontale, non ci sono pertanto variazioni di quota:  $dz=0$ .

L'equazione di Bernoulli si scrive quindi così:

$$dh' - dh_a = 0$$

$$h' = h_{a,d}$$

Per calcolare le perdite di carico distribuite è necessario trovare prima  $w$ ,  $Re$ ,  $\lambda$ :

$$w = \frac{4G_V}{D_H^2 \pi} = 1.02 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho w D_H}{\mu} = 4.03 \cdot 10^6$$

Per calcolare il valore del coefficiente di Darcy non si può usare la legge di Blasius, benché il tubo sia liscio, perché il campo di validità di suddetta legge per quanto riguarda il numero Reynolds è:

$$4000 < Re < 10^5$$

Uso quindi la relazione di Haaland, assumendo però  $\varepsilon/D_H = 0$ :

$$\lambda = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D_H} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} = 0.01$$

$$h_{a,d} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g} = 78.7 \text{ m}$$

$$h' = h_{a,d} = 78.7 \text{ m}$$

La potenza di pompaggio è data dalla seguente relazione:

$$W_p = g \cdot G \cdot h' = g \cdot G_V \rho \cdot h' = 15 \text{ MW}$$

### Esercizio 5.11

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

Non essendoci pompe, dislivelli o variazioni di velocità, sono rispettivamente nulli i termini  $dh'$ ,  $dz$  e  $dw$ . L'equazione si riscrive così:

$$\frac{dp}{\gamma} = -dh_a$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = h_{a,d}$$

Per calcolare le perdite di carico distribuite è necessario trovare prima  $w$ ,  $Re$ ,  $\lambda$ :

$$w = \frac{4G_V}{D_H^2 \pi} = 3.18 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho w D_H}{\mu} = 636$$

Il moto del fluido è quindi laminare. Calcolo il coefficiente di Darcy con l'apposita formula, ricordando che per condotti a sezione circolare vale  $c=64$ :

$$\lambda = \frac{c}{\text{Re}} = \frac{64}{636} = 0.1$$

le perdite di carico distribuite valgono quindi:

$$h_{a,d} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g} = 51.6 \text{ m}$$

$$\Delta p = \gamma \cdot h_{a,d} = \rho g \cdot h_{a,d} = 408 \text{ kPa}$$

Se le perdite di carico si riducono ad un terzo del valore appena calcolato, il loro valore sarà:

$$\tilde{h}_{a,d} = \frac{h_{a,d}}{3} = 17.2 \text{ m}$$

Sapendo che:

$$w = \frac{4G_V}{D_H^2 \pi}$$

$$\lambda = \frac{c}{\text{Re}} = 64 \cdot \frac{\mu}{\rho w D_H^2} = \frac{16\mu D \pi}{\rho G_V}$$

Sostituisco i valori trovati nell'espressione delle perdite di carico distribuite e ottengo:

$$h_{a,d} = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{\bar{w}^2}{2g} = \frac{128\mu L G_V}{\rho g \pi D_H^4}$$

Da cui si ricava il valore del diametro cercato:

$$D_H = \sqrt[4]{\frac{128\mu L G_V}{\rho g \pi \cdot \tilde{h}_{a,d}}} = 0.132 \text{ m}$$

### Esercizio 5.12

Dati:

$D_{cond} = 400 \text{ mm} = 0.4 \text{ m}$  diametro condotta;

$d_{ug} = 100 \text{ mm} = 0.1 \text{ m}$  diametro finale dell'ugello.

Si scrive l'equazione generalizzata di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

- Non ci sono cadute di pressione: il sistema che studiamo è composto da un serbatoio aperto (in cui il fluido è quindi a pressione atmosferica) che, tramite una condotta forzata, termina in un ugello anch'esso aperto verso l'ambiente;
- Non essendoci pompe la prevalenza  $dh'$  è nulla;
- La velocità iniziale è nulla (nel serbatoio il fluido si trova in quiete) mentre la finale è quella che si osserva all'uscita dell'ugello  $w_{ug}$ .
- Le perdite di carico da considerare sono solo quelle distribuite; dato che l'ugello è ben rastremato si trascurano le perdite di carico distribuite al suo interno: le perdite di carico da calcolare sono quindi quelle distribuite nella condotta *a monte* dell'ugello. La velocità da considerare è quella nella condotta  $w_{cond}$  (che è naturalmente diversa da quella al termine dell'ugello).

L'equazione di Bernoulli si può quindi riscrivere così:

$$\frac{\alpha}{2g} w_{ug}^2 - h = -\lambda \frac{L}{D_{cond}} \frac{w_{cond}^2}{2g}$$

Però all'interno di quest'equazione sono incognite sia la velocità in uscita dall'ugello  $w_{ug}$  sia la velocità all'interno della condotta  $w_{cond}$ .

Il legame tra queste due grandezze è dato dalla principio di conservazione della massa espresso come portata costante nel sistema, cioè:

$$G = \rho w_{ug} A_{ug} = \rho w_{cond} A_{cond} = cost.$$

Ipotizzando il fluido incomprimibile,  $\rho$  rimane costante per cui posso scrivere:

$$\rho w_{ug} A_{ug} = \rho w_{cond} A_{cond} \Rightarrow w_{ug} A_{ug} = w_{cond} A_{cond} \Rightarrow w_{ug} \frac{\pi d_{ug}^2}{4} = w_{cond} \frac{\pi D_{cond}^2}{4}$$

$$w_{cond} = w_{ug} \frac{d_{ug}^2}{D_{cond}^2}$$

Sostituendo questo valore nell'equazione di Bernoulli semplificata si ottiene:

$$\frac{\alpha}{2g} w_{ug}^2 - h = -\lambda \frac{L}{D_{cond}} \frac{w_{ug}^2 \frac{d_{ug}^4}{D_{cond}^4}}{2g}$$

$$w_{ug} = \sqrt{\frac{2gh}{\alpha + \lambda L \frac{d_{ug}^4}{D_{cond}^5}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.8 \cdot 900}{1.06 + 0.02 \cdot 1500 \frac{0.1^4}{0.4^5}}} = 118 \text{ m/s}$$

La portata di acqua G si ottiene immediatamente dall'espressione:

$$G = \rho w_{ug} A_{ug} = \rho w_{ug} \frac{\pi d_{ug}^2}{4} = 926 \text{ kg/s}$$

Per calcolare la pressione prima della restrizione dell'ugello consideriamo il sistema parziale costituito da bacino e condotta, trascurando proprio l'ugello. Per un tale sistema scriviamo l'equazione di Bernoulli:

$$\frac{dp}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} d\bar{w}^2 + dz = dh' - dh_a$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma} + \frac{\alpha}{2g} w_{cond}^2 - h = -h_a$$

La semplificazione è possibile perché non ci sono organi meccanici per cui  $dh'=0$ ;  $\Delta p$  indica la pressione relativa, la differenza tra la pressione atmosferica (a cui si trova il fluido nel bacino) e quella all'uscita della condotta.

Il valore della velocità nella condotta è dato dalla seguente relazione:

$$w_{cond} = w_{ug} \frac{d_{ug}^2}{D_{cond}^2} = 118 \cdot \frac{0.1^2}{0.4^2} = 7.375 \text{ m/s}$$

Ricordando che  $\gamma = \rho g$ , il valore della pressione vale:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = h - \frac{\alpha}{2g} w_{cond}^2 - h_a \Rightarrow \Delta p = \rho g h - \frac{\alpha \rho}{2} w_{cond}^2 - \frac{\lambda \rho}{2} \frac{L}{D_{cond}} w_{cond}^2 = 6.53 \text{ MPa}$$

La potenza meccanica teoricamente ottenibile dal getto d'acqua è:

$$W' = G \cdot e_{c,ug}$$

L'energia cinetica specifica all'ugello vale:

$$e_{c,ug} = \frac{1}{2} w_{ug}^2 = 6.96 \text{ kJ}$$

da cui:

$$W' = G \cdot e_{c,ug} = 926 \cdot 6.96 = 6.45 \text{ MW}$$

La potenza meccanica teoricamente disponibile è data da:

$$W'' = G \cdot e_p$$

L'energia potenziale specifica si calcola nel seguente modo:

$$e_p = gh = 8.82 \text{ kJ}$$

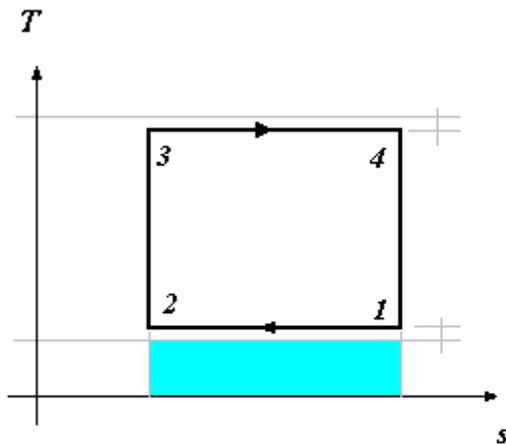
da cui:

$$W'' = G \cdot e_p = 926 \cdot 8.82 = 8.17 \text{ MW}$$

La differenza tra  $W''$  e  $W'$  (1.72 MW) è stata dissipata a causa delle perdite di carico nel condotto. Se tale quantità è giudicata elevata, il metodo più elementare per ridurla è allargare il diametro del condotto, riducendo così la velocità del fluido e quindi anche le perdite di carico.

Capitolo 6

Esercizio 6.1 (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)



	$p$ [bar]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]	$T$ [°C]
1	2.32		270
2	2.03		270
3	40	0.03	1000
4	45.67	0.08	1000

Nelle celle evidenziate si trovano i valori di input.

Il rendimento del ciclo di Carnot si calcola con la seguente formula (ricordando che le temperature vanno espresse in gradi kelvin):

$$\eta_c = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 1 - \frac{(270 + 273.15)}{(1000 + 273.15)} = 0.573$$

La pressione al punto 4 ( $p_4$ ) si calcola con l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$pv = RT \Rightarrow p_4 v_4 = RT_4 \Rightarrow p_4 = \frac{RT_4}{v_4} = \frac{287 \cdot (1000 + 273.15)}{0.08} = 45.67 \text{ bar}$$

Calcoliamo ora le potenze termiche  $W_{TF}$  e  $W_{TC}$  scambiate tra sistema ed esterno e la potenza meccanica utile ottenuta  $W_m$ .

Come si vede anche dal grafico, il ciclo di Carnot è formato da due isoterme (1-2 , 3-4) e da due isoentropiche (2-3 , 4-1); per queste ultime, come si evince dal grafico, possiamo scrivere:

$$ds_{23} = s_2 - s_3 = ds_{41} = s_4 - s_1 = 0$$

Per i gas perfetti la variazione di entropia è espressa con la seguente espressione:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

Grazie alla condizione di isoentropicità, la precedente si può semplificare e si ottiene:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} = 0 \Rightarrow \begin{cases} c_p \ln \frac{T_2}{T_3} = R \ln \frac{p_2}{p_3} \Rightarrow p_2 = p_3 \left( \frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{c_p}{R}} = 2.03 \text{ bar} \\ c_p \ln \frac{T_1}{T_4} = R \ln \frac{p_1}{p_4} \Rightarrow p_1 = p_4 \left( \frac{T_1}{T_4} \right)^{\frac{c_p}{R}} = 2.32 \text{ bar} \end{cases}$$

La potenza termica ceduta dal sistema all'ambiente ( $W_{TF}$ ) è l'area sottesa dalla "curva" 1-2: siccome la curva in questione è una retta, l'area richiesta è quella del rettangolo evidenziata e si calcola nel seguente modo:

$$|W_{TF}| = T_F (s_1 - s_2)$$

La quantità  $s_1 - s_2$  si ottiene dalla relazione già scritta in precedenza che descrive la variazione dell'entropia per i gas perfetti:

$$s_1 - s_2 = c_p \ln \frac{T_1}{T_2} - R \ln \frac{p_1}{p_2} = -R \ln \frac{p_1}{p_2} = 38 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Per ovvie ragioni geometriche  $s_4 - s_3 = s_1 - s_2$ .

Si ottengono quindi le quantità cercate:

$$|W_{TF}| = T_F (s_1 - s_2) = 20.64 \text{ kW}$$

$$|W_{TC}| = T_C (s_4 - s_3) = 48.83 \text{ kW}$$

$$|W_m| = |W_{TC}| - |W_{TF}| = 27.74 \text{ kW}$$

Si può calcolare nuovamente il rendimento, questa volta considerandolo come il rapporto tra "l'effetto utile prodotto" (e cioè la potenza meccanica utile, trattandosi di macchina termica semplice motrice) e "la spesa sostenuta per ottenerlo" (ossia la potenza termica prelevata dal serbatoio di energia termica a temperatura più elevata):

$$\eta_c = \frac{|W_m|}{|W_{TC}|} = 0.573$$

La soluzione naturalmente coincide con quella precedentemente trovata.

### Esercizio 6.2 (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Si ha:

$$|W_{TC}| = 2000 \text{ kJ}$$

$$|W_{TF}| = 600 \text{ kJ}$$

$$|W_m| = 1700 \text{ kJ}$$

Il bilancio energetico del ciclo è:

$$|W_{TC}| - |W_{TF}| - |W_m| = 2000 - 600 - 1700 = -300 \neq 0$$

Il bilancio risulta non nullo, quindi in disaccordo con il principio di conservazione dell'energia. Un ciclo con simili prestazioni è pertanto impossibile da realizzare.

### Esercizio 6.3 (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Dati:

$$T_C = 550^\circ\text{C}$$

$$T_F = 30^\circ\text{C}$$

Tra tutti i cicli termodinamici che hanno queste temperature estreme, quello a rendimento maggiore è il ciclo di Carnot:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 1 - \frac{30 + 273.15}{550 + 273.15} = 0.635$$

Non è possibile che, a parità di temperature estreme, un qualsiasi ciclo termodinamico (compreso il ciclo Rankine in esame) abbia rendimento superiore a  $\eta_c$ .

**Esercizio 6.4** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Dati:

$$T_C = 25^\circ\text{C}$$

$$T_F = 5^\circ\text{C}$$

$$|W_{TC}| = 10 \text{ kW}$$

Il coefficiente di prestazione della migliore macchina operatrice (ossia della macchina termica inversa reversibile) è dato da:

$$COP_{p,REV} = \frac{T_C}{T_C - T_F} = 14.9$$

Il coefficiente di prestazione si può esprimere anche in altra forma:

$$COP_{p,REV} = \frac{|W_{TC}|}{|W_m|} \Rightarrow |W_m| = \frac{|W_{TC}|}{COP_{p,REV}} = 0.671 \text{ kW}$$

**Esercizio 6.5** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Dati:

$$W_{el} = 1000 \text{ MW}$$

$$G = 50 \text{ t/s} = 50000 \text{ kg/s}$$

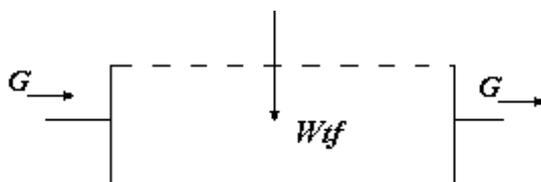
Si può calcolare il rendimento considerandolo come il rapporto tra “l’effetto utile prodotto” (e cioè la potenza elettrica ottenuta) e “la spesa sostenuta per ottenerlo” (ossia la potenza termica prelevata dal serbatoio di energia termica a temperatura più elevata):

$$\eta = \frac{|W_{el}|}{|W_{TC}|} = 0.412 \Rightarrow |W_{TC}| = \frac{|W_{el}|}{\eta} = \frac{1000}{0.412} = 2427 \text{ MW}$$

Il condensatore serve per scambiare la potenza termica ceduta dal sistema al serbatoio di energia termica a temperatura inferiore; la potenza termica interessata è quindi la  $W_{TF}$ , che si calcola facendo il bilancio di energia del sistema:

$$|W_{TF}| = |W_{TC}| - |W_{el}| = 1427 \text{ MW}$$

A questo punto non rimane che fare il bilancio di energia del secondario del condensatore, qui sotto schematizzato:



$$W_{TF} + G(h_i - h_u) = 0$$

$$W_{TF} = G(h_u - h_i) = 4.2G\Delta T$$

L’ultimo passaggio è giustificato dal fatto che l’entalpia dell’acqua sottoraffreddata può essere valutata con la seguente espressione:

$$h \cong 4.2T$$

La variazione di temperatura dell'acqua vale quindi:

$$\Delta T = \frac{W_{TF}}{4.2G} = 6.8 \text{ K}$$

**Esercizio 6.6** (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

a. Applicando il primo principio della termodinamica al motore termico abbiamo:

$$W_{TC} = W_{TF} + W_M = 9.0 + 7.5 = 16.5 \text{ kW}$$

il rendimento del motore è quindi

$$\eta = \frac{W_M}{W_{TC}} = \frac{7.5}{16.5} = 0.455$$

b. Il rendimento di un motore che operasse in maniera reversibile tra le stesse due sorgenti termiche dovrebbe essere funzione soltanto delle temperature di queste ultime, essendo in particolare

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 1 - \frac{323.15}{673.15} = 0.520$$

dal momento che  $\eta < \eta_{rev}$ , si può concludere che il motore opera seguendo un ciclo irreversibile con produzione entropica.

**Esercizio 6.7** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Valutiamo la disponibilità specifica del sistema assumendo

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$p_0 = 101.3 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$

$$a = (u + e_c + e_p - u_0) - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v)$$

Per un fluido incomprimibile si hanno le seguenti semplificazioni:

$$dv = v_0 - v = 0$$

$$du = u - u_0 = c \cdot dT = c(T - T_0)$$

$$ds = c \frac{dT}{T}$$

L'espressione della disponibilità si può quindi semplificare:

$$a = c(T - T_0) - T_0 c \ln \frac{T}{T_0} = 12.9 \text{ kJ/kg}$$

$$A = a \cdot M = 25.8 \text{ kJ}$$

**Esercizio 6.8** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Considero il freno da un punto di vista termodinamico e ne faccio il bilancio energetico:

$$W_t + G(h_i - h_u) = 0$$

Il freno è un macchina completamente dissipativa, trasforma tutta la potenza meccanica in potenza termica. Nel bilancio energetico è del tutto equivalente inserire quindi l'espressione della potenza meccanica  $W_m$  o l'espressione della potenza termica  $W_t$ , e questo si esprime matematicamente come:

$$|W_m| = |W_t| = 50 \text{ kW}$$

Ricordando la relazione che lega, per un fluido incomprimibile, la variazione di entalpia alla temperatura

$$h \cong 4.2T$$

calcolo il valore della portata richiesto:

$$G = \frac{W_t}{4.2 \cdot \Delta T} = \frac{50000}{4.2 \cdot (70 - 25)} = 0.27 \text{ kg/s}$$

Ricordando che la disponibilità del fluido che si trova allo stato morto ( $T_0, p_0, h_0$ ) è nulla (e quindi ( $a_{f,i} = 0$ ), la disponibilità distrutta è data dalla seguente relazione:

$$\begin{aligned} \dot{A}_{irr} &= W_t - G(a_{f,u} - a_{f,i}) = W_t - G \cdot a_{f,u} = W_t - G \left[ c(T - T_0) - cT_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] = \\ &= 50000 - 0.27 \left[ 4186(343 - 298) - 4186 \cdot 298 \ln \frac{343}{298} \right] = 46.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

La disponibilità distrutta è inferiore alla potenza meccanica introdotta nel sistema perché parte di essa viene recuperata sotto forma di calore dal flusso di acqua, che si scalda.

Si osserva che la disponibilità distrutta è data dalla differenza tra la potenza meccanica introdotta meno l'aumento di disponibilità dovuto all'innalzamento della temperatura dell'acqua di raffreddamento (che in uscita ha un temperatura  $T > T_0$ )

Si può definire un rendimento di secondo principio del freno come:

$$\varepsilon = \frac{\text{disponib. recuperata dall'acqua}}{\text{disponib. distrutta dal freno}} = \frac{3.5}{50} = 0.07$$

Il freno distrugge il 93% della disponibilità che si introduce sotto forma di potenza meccanica mentre si recupera il 7% di detta disponibilità sotto forma di calore che si manifesta con un aumento di temperatura dell'acqua di raffreddamento.

### Esercizio 6.9 (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Nel caso di compressione adiabatica e reversibile (e quindi isoentropica) la temperatura al termine della trasformazione 1-2i è:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} = 0 \Rightarrow c_p \ln \frac{T_{2i}}{T_1} = R \ln \frac{p_{2i}}{p_{31}} \Rightarrow T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_{2i}}{p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} = 538 \text{ K}$$

Nel caso di compressione reale (e quindi caratterizzata da un rendimento di compressione  $\eta_c$  minore di uno) la temperatura al termine della trasformazione 1-2r è:

$$\eta_c = \frac{h_{2i} - h_1}{h_{2r} - h_1} = \frac{T_{2i} - T_1}{T_{2r} - T_1} \Rightarrow T_{2r} = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_c} = 598 \text{ K}$$

	$p$ [bar]	$T$ [K]
1	1.013	298
2i	8	538
2r	8	598

La potenza assorbita (che avrà segno negativo in quanto trattasi di potenza fornita dall'ambiente al sistema) vale, nel caso reale:

$$W_c = -c_p G \Delta T = -1005 \cdot 0.3 \cdot (598 - 298) = -90.45 \text{ kW}$$

La potenza minima di compressione si ha quando la disponibilità fornita al fluido sotto forma di lavoro di compressione si trasferisce completamente al fluido sotto forma di aumento di pressione e temperatura.

Matematicamente si scrive:

$$W_{c,\min} = G(a_{f,i} - a_{f,u})$$

Siccome il fluido all'ingresso si trova allo stato morto ( $T_0, p_0, h_0$ ) la sua disponibilità è nulla ( $a_{f,i} = 0$ ). Passiamo a calcolare il valore della potenza:

$$W_{c,\min} = -Ga_{f,u} = -G[h - h_0 - T_0(s - s_0)] = -G\left[c_p(T - T_0) - T_0\left(c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0}\right)\right] = -81.22 \text{ kW}$$

Dove abbiamo usato le seguenti relazioni, valide per calcolare le variazioni di entalpia ed entropia nei gas perfetti:

$$dh = c_p dT$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

Il rendimento di secondo principio si calcola immediatamente:

$$\varepsilon = \frac{W_{c,\min}}{W_c} = \frac{81.22}{90.45} = 0.90$$

Questo significa che il 90% della disponibilità fornita dal compressore al fluido come lavoro meccanico effettivamente contribuisce ad aumentarne i valori di pressione e temperatura mentre il restante 10% della disponibilità viene sprecato in attriti e irreversibilità.

### Esercizio 6.10 (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)

Dati:

$$G = 10 \text{ t/h} = 2.78 \text{ kg/s}$$

	$T$ [°C]	$p$ [bar]	$v$ [ $m^3/Kg$ ]	$u$ [kJ/Kg]	$h$ [kJ/Kg]	$s$ [kJ/Kg · K]	$x$
1	300	40	$5.884 \cdot 10^{-2}$	2725.34	2960.69	6.361	-
2i	99.63	1	1.414	2161.79	2303.29	6.361	0.8352
2r	99.63	1	1.513	2283.42	2434.77	6.7137	0.8934
3	25	1	$1.012 \cdot 10^{-3}$	104.86	104.96	0.367	-

Nel caso di espansione reale (e quindi caratterizzata da un certo rendimento di espansione  $\eta_t$ ) la temperatura al termine della trasformazione 1-2r è:

$$\eta_t = \frac{h_{2i} - h_1}{h_{2r} - h_1} \Rightarrow h_{2r} = h_1 + \eta_t (h_{2i} - h_1) = 2434.77 \text{ kJ/kg}$$

La potenza massima disponibile si ottiene dal bilancio di disponibilità per un sistema aperto a regime. Si tratta della massima potenza ottenibile dal fluido nella trasformazione 1-3, cioè da 1 allo stato morto, perché i valori dello stato 3 sono proprio quelli dello stato morto. Ricordando che  $T_0 = T_3 = 298K$  matematicamente si ha:

$$\begin{aligned} W'_{m,a} &= G(a_{f,i} - a_{f,u}) = G[(h_1 - h_3) - T_0(s_1 - s_3)] = \\ &= 2.78[(2960.69 - 104.96) - 298(6.361 - 0.367)] = 2.96 \text{ MW} \end{aligned}$$

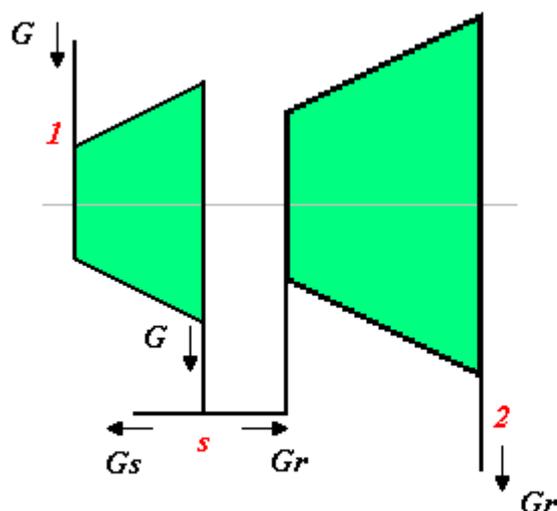
La potenza erogata vale:

$$W'_m = G(h_1 - h_{2r}) = 1.42 \text{ MW}$$

L'efficienza di secondo principio si calcola immediatamente:

$$\varepsilon = \frac{W'_m}{W'_{m,a}} = \frac{1.42}{2.96} = 0.48$$

**Esercizio 6.11** (Soluzione redatta dallo studente Giacomo Garofalo)



	$T$ [°C]	$p$ [bar]	$u$ [kJ/kg]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg K]	$x$
1	350	30	2843.70	3115.30	6.7428	-
s	200	5	2642.90	2855.40	7.0592	-
2	53.97	0.15	2226.42	2361.78	7.2831	0.9
Punto Morto $P_0$	25	1	104.86	104.96	0.367	-

Nelle celle evidenziate si trovano i valori di input.

Facciamo alcune considerazioni.

Una turbina con uno spillamento va studiata con le dovute cautele perché è necessario tenere a mente che la portata al suo interno non rimane costante durante la trasformazione 1-2 ma passa dal valore  $G$  (a monte dello spillamento) al valore  $G_r$  (a valle dello spillamento). La turbina si può considerare analoga ad una turbina multistadio dove nel primo stadio avviene l'espansione della portata  $G$  (trasformazione 1-s) e nel secondo stadio avviene l'espansione della portata  $G_r$  (trasformazione s-2).

Inoltre, dato che le perdite termiche avvengono alla temperatura dello stato morto, non contribuiscono in alcun modo alla disponibilità del sistema, non potendo produrre lavoro e perciò non le considereremo.

Le portate sono tutte note, e indicando con  $G_s$  la portata spillata, valgono:

$$G = 30 \text{ kg/s}$$

$$G_s = 5 \text{ kg/s}$$

$$G_r = G - G_s = 25 \text{ kg/s}$$

La potenza erogata dalla turbina è pertanto la somma delle potenze erogate singolarmente dai due stadi meno le perdite termiche dell'involucro:

$$W'_m = G(h_1 - h_s) + G_r(h_s - h_2) - |W_t| = 7.7 \text{ MW} + 12.3 \text{ MW} - 0.15 \text{ MW} = 19.85 \text{ MW}$$

La potenza meccanica sviluppata nel secondo stadio è maggiore in quanto il salto entalpico della trasformazione s-2 è maggiore del salto entalpico della trasformazione 1-s.

Le exergie del vapore si ottengono direttamente:

$$a_{f,i} = (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) = 1109.6 \text{ kJ/kg} \quad \text{exerg.vapore ingresso}$$

$$a_{f,u,s} = (h_s - h_0) - T_0 (s_s - s_0) = 755.3 \text{ kJ/kg} \quad \text{exerg.vapore spillato}$$

$$a_{f,u,2} = (h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0) = 195.0 \text{ kJ/kg} \quad \text{exerg.vapore uscita al punto 2}$$

La potenza massima erogabile dalla turbina è data dalla somma delle potenze massime erogabili singolarmente dai due stadi. Si ha quindi:

$$W'_{m,a} = G(a_{f,i} - a_{f,u,s}) + G_r(a_{f,u,s} - a_{f,u,2}) = 10.6 \text{ MW} + 14 \text{ MW} = 24.6 \text{ MW}$$

Il rendimento di secondo principio è dato dal seguente rapporto:

$$\varepsilon = \frac{W'_m}{W'_{m,a}} = \frac{20.0}{24.6} = 0.811$$

**Capitolo 7**

**Esercizio 7.8** (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

a) Con riferimento ai dati del programma CATT, o al diagramma di Mollier del vapor d'acqua saturo, possiamo rappresentare i dati relativi al ciclo nella successiva tabella (in cui la coppia di dati a partire dai quali si ricavano le altre variabili è evidenziata in colore):

Stato	$p$ , bar	$T$ , °C	$x$	$h$ , kJ/kg	$s$ , kJ/kgK	Note
1	0.2	60.06	0.0	251.4	0.8320	
2	20.0	60.6	-	253.4	0.8320	$s_2=s_1$
3	20.0	400.0	-	3247.6	7.1271	
4	0.2	60.06	0.8896	2349.3	7.1271	$s_4=s_3$

$h_2$ , dato in genere non reperibile nelle tabelle, può essere ricavato dalla equazione

$$w_x = -v(p_2 - p_1)$$

che permette di determinare il lavoro per unità di massa che si spende nel caso di compressione reversibile di un liquido, quindi

$$h_2 = h_1 - w_x = h_1 + v_1(p_2 - p_1) = 251.4 + 0.001017 \times (2000 - 20) = 253.4 \text{ kJ/kg}$$

b) Gli scambi termici e i lavori relativi alle singole trasformazioni sono:

$$\begin{aligned} q_{12} &= 0 & (l')_{12} &= h_1 - h_2 = -2.0 \text{ kJ/kg} \\ q_{23} &= h_3 - h_2 = 2994.3 \text{ kJ/kg} & (l')_{23} &= 0 \\ q_{34} &= 0 & (l')_{34} &= h_3 - h_4 = 898.3 \text{ kJ/kg} \\ q_{41} &= h_1 - h_4 = -2097.9 \text{ kJ/kg} & (l')_{41} &= 0 \\ q_{tot} &= \sum q_i = 896.3 \text{ kJ/kg} & (l')_{tot} &= \sum l'_i = 896.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

c) Il rendimento del ciclo si valuta come

$$\eta = \frac{(l')_{tot}}{q_{in}} = \frac{896.3}{2994.2} = 0.299$$

dato che il lavoro della pompa (1-2) è trascurabile ed  $h_2$  è molto vicino ad  $h_1$ , il rendimento è anche calcolabile con buona approssimazione come

$$\eta = \frac{(l')_{34}}{q_{23}} \cong \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} = 0.2998$$

che consente di evitare il calcolo di  $h_2$

d) Il rendimento del Ciclo di Carnot equivalente tra la temperatura minima e la temperatura massima del presente ciclo è:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{(273.15 + 60.0)}{(273.15 + 400)} = 0.505$$

**Esercizio 7.9** (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

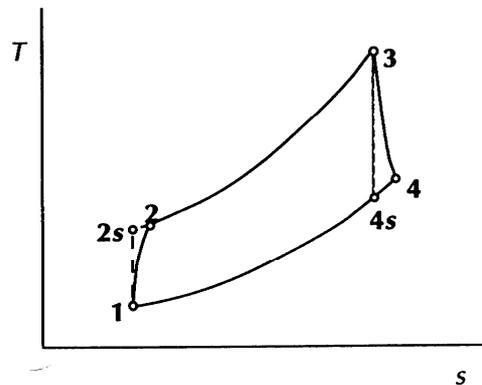
Le seguenti conclusioni possono essere verificate facendo uso del diagramma  $T-s$  e di quello di Mollier e dei calcoli svolti nell'esercizio precedente (per farsi un'idea, si può fissare la temperatura di ammissione del vapore in turbina a 500 °C e la pressione nel condensatore a 0.05 bar).

- il lavoro della pompa cresce in quanto cresce la pressione di uscita

- il lavoro della turbina aumenta perché cresce il salto di pressione relativo all'espansione; sul piano  $h$ - $s$  il punto 3 ha praticamente la stessa entalpia, mentre l'entalpia del punto 4 decresce;
- Il calore fornito in caldaia diminuisce anche se di molto poco; infatti  $h_3$  subisce una lieve diminuzione (bisogna tenere conto che il vapore nel punto 3 è vicino alle condizioni di gas ideale e quindi l'entalpia ha una debole dipendenza dalla pressione) ed  $h_2$  aumenta un po';
- Il calore trasferito nel condensatore diminuisce in quanto, a parità di  $h_1$ ,  $h_4$  diminuisce. Nel piano  $T$ - $s$  si vede che a parità di temperatura diminuisce il  $\Delta s$ .
- Il rendimento del ciclo aumenta in quanto il calore ceduto in caldaia resta praticamente costante, mentre il lavoro in turbina aumenta; (in termini di temperature medie termodinamiche del fluido si ha che a parità di quella inferiore cresce quella superiore).
- Il titolo del vapore all'uscita della turbina diminuisce perché il punto 4 si sposta verso sinistra sul piano  $T$ - $s$  o  $h$ - $s$ .

**Esercizio 7.10** (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

I cicli ideale e reale sono rappresentati nel sottostante diagramma  $T$ - $s$  del gas ideale.



a) Nel caso del ciclo ideale, le temperature incognite  $T_{2s}$  e  $T_{4s}$  si trovano alla seguente maniera:

$$T_{2s} = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 300 \cdot 4^{0.4/1.4} = 445.8 \text{ K}$$

$$T_{4s} = T_3 \cdot \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 1200 \cdot 0.25^{0.4/1.4} = 807.5 \text{ K}$$

Il rendimento del ciclo ideale è dato da

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{300}{445.8} = 0.3271$$

b) La potenza in uscita è data da

$$W = G \cdot l_{tot}$$

dove

$$l_{tot} = (h_3 - h_{4s}) + (h_1 - h_{2s}) = \frac{kR}{k-1} (T_3 - T_{4s} + T_1 - T_{2s}) =$$

$$= 3.5 \cdot \left( \frac{8.3143}{29} \right) \cdot (1200 - 807.5 + 300 - 445.8) = 247.6 \text{ kJ / kg}$$

Quindi

$$W = 5 \cdot 247.6 = 1238 \text{ kW}$$

c) Affinchè il lavoro netto in uscita sia nullo, il lavoro ottenuto in turbina deve uguagliare quello speso nel compressore. Deve quindi essere

$$(h_3 - h_{4s}) \cdot \eta_e = \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_c}$$

quindi

$$\eta_e \cdot \eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_3 - T_{4s}} = 0.3715$$

Per cui nel caso particolare in cui si abbia  $\eta_e = \eta_c$

$$\eta_e = \eta_c = \sqrt{0.3715} = 0.6095$$

d)  $T_2$  e  $T_4$  sono trovati mediante le relazioni:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_c} = 300 + \left( \frac{445.8 - 300}{0.6095} \right) = 539.2 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 + \eta_e \cdot (T_{4s} - T_3) = 1200 + 0.6095 \cdot (807.5 - 1200) = 960.8 \text{ K}$$

### Esercizio 7.11 (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

Per prima cosa si calcolano pressione e temperatura in ogni punto del ciclo come definiti in figura.

$$p_4 = p_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$p_2 = p_3 = 4 p_1 = 400 \text{ kPa}$$

e assumendo per l'aria  $k=1.4$

$$T_{2s} = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 300 \cdot 4^{0.286} = 445.8 \text{ K}$$

$$T_{4s} = T_1 \cdot \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 1200 \cdot 0.25^{0.286} = 807.54 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_c} = 300 + \frac{445.8 - 300}{0.85} = 471.53 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 + (T_{4s} - T_3) \cdot \eta_e = 1200 + (807.54 - 1200) \cdot 0.9 = 846.79 \text{ K}$$

Dato che le portate negli stati 2 e 4 sono uguali, che il gas è considerato ideale con  $c_p$  costante, e che il rigeneratore è considerato ideale, ne segue che il flusso caldo esce dal rigeneratore alla temperatura del flusso freddo ed il flusso freddo esce alla temperatura iniziale del flusso caldo. In altri termini si ha

$$T_{4*} = T_2 = 471.53 \text{ K}$$

$$\text{e} \quad T_{2*} = T_4 = 846.79 \text{ K}$$

La potenza netta in uscita è

$$\begin{aligned} W_m &= G \cdot [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] = G \cdot c_p \cdot [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] = \\ &= 8 \cdot 1.0035 \cdot [(1200 - 846.79) - (471.53 - 300)] = 1458.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

b) Il rendimento del ciclo è pari a

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_{2*})} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_{2*})} = 0.514$$

Capitolo 8

Esercizio 8.1 (Soluzione redatta da Alessandro Franco)

a) Poiché una differenza di temperatura di 3 K è richiesta nello scambiatore, la temperatura di evaporazione è di -10°C e la temperatura di condensazione è di 41°C. La pressione superiore del ciclo si trova a partire dalla temperatura di condensazione (41 °C) e, consultando le tabelle o mediante il programma CATT risulta essere 0.9845 Mpa. La pressione inferiore viene determinata a partire dalla temperatura di evaporazione (-10 °C) e risulta essere 0.2191 Mpa. Se assumiamo che lo stato 1 sia quello di vapore saturo (a bassa temperatura) e lo stato 3 quello di liquido saturo (ad alta temperatura), le relative proprietà sono riportate nella successiva tabella, dove le caselle corrispondenti ai dati di ingresso sono evidenziate in grigio.

	$p$ MPa	$T$ °C	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K	$x$	stato
1	0.2191	-10	183.2	0.7019	1	Satur. Vapor
2i	0.9845	49.03	209.8	0.7019		Superh. Vapor
2	0.9845	60.6	218.7	0.7289		Superh. Vapor
3	0.9845	41	75.6	0.275	0	Satur. Liquid
4	0.2191	-10	75.6	0.2931	0.3117	Two-phase

l'entalpia del punto finale della compressione reale ( $h_2$ ) è stata ricavata dalla definizione di rendimento isoentropico

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2i} - h_1}{\eta_c} = 183.2 + \frac{209.8 - 183.2}{0.75} = 218.7 \text{ kJ/kg}$$

b) Il coefficiente di prestazione (COP) è dato da

$$COP = \frac{Q_C}{L} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{183.2 - 75.6}{218.7 - 183.2} = 3.03$$

c) la portata di fluido necessaria è ottenibile dal bilancio dell'evaporatore:

$$W_F = G(h_1 - h_4) = 6 \text{ kW}$$

$$G = \frac{W_F}{h_1 - h_4} = \frac{6}{183.2 - 75.6} = 0.056 \text{ kg/s}$$

d) La potenza ideale richiesta dal compressore è data da

$$W_{m,id} = G(h_{2s} - h_1) = 0.056(209.8 - 183.2) = 1.49 \text{ kW}$$

e quella assorbita dalla rete elettrica, tenuto conto di tutti i rendimenti

$$W_m = \frac{W_{m,id}}{\eta_c \eta_m} = \frac{1.49}{0.75 \cdot 0.94} = 2.11 \text{ kW}$$

l'allievo può verificare che quest'ultimo risultato era ottenibile più rapidamente anche tramite

$$W_m = \frac{W_f}{COP \eta_m}$$

**APPENDICE 7 – Problemi assegnati nei compiti**

**ESERCIZIO C.1 (1994, gruppo A)**

In un sistema aperto a regime fluisce una portata  $G=2$  kg/s di vapor d'acqua inizialmente nelle condizioni:  $p_1=2$  bar,  $x_1=1$ .

Il fluido subisce le seguenti trasformazioni:

- 1-2 compressione adiabatica reversibile fino a  $p_2=5$  MPa;
- 2-3 raffreddamento isobaro fino a  $x_3=0.86$ .

Tracciare le trasformazioni sul diagramma allegato e determinare:

- a. il valore di  $T_2$  e  $T_3$ ;
- b. la potenza meccanica necessaria per effettuare la compressione;
- c. il calore scambiato per unità di tempo durante la fase 2-3;
- d. la potenza necessaria e la temperatura finale  $T_2'$  del vapore se la fase di compressione (1-2') avviene in una macchina reale con rendimento isoentropico  $\varepsilon=0.8$  fino alla pressione  $p_2'=p_2$ .

**DOMANDA OPZIONALE**

- e. Determinare le condizioni finali  $T_4$  e  $x_4$  se, a partire dalle condizioni 3, il fluido viene fatto laminare (*trasformazione irreversibile, adiabatica in cui non si raccoglie lavoro utile*) in una valvola fino a pressione  $p_4=0.01$  MPa.

[825 K; 535 K; -1696 kW; -1980 kW; -2120 kW, 916 K; 320K, 0.99]

**ESERCIZIO C.2 (1994, gruppo B)**

In un sistema aperto a regime fluisce una portata  $G=5$  kg/s di ammoniaca inizialmente nelle condizioni:  $p_1=2$  MPa,  $x_1=0.9$ .

Il fluido subisce le seguenti trasformazioni:

- 1-2 riscaldamento isobaro fino a  $T_2=400$  K;
- 2-3 espansione adiabatica reversibile fino a  $p_3=1.4$  bar.

Tracciare le trasformazioni sul diagramma allegato e determinare:

- a. il calore scambiato per unità di tempo durante la fase 1-2;
- b. la potenza meccanica erogata nell'espansione;
- c. il valore di  $x_3$  e di  $T_3$
- d. la potenza erogata e il titolo finale  $x_3'$  del vapore se la fase di espansione (2-3') avviene in una macchina reale con rendimento isoentropico  $\varepsilon=0.9$  fino alla pressione  $p_3'=p_3$ .

**DOMANDA OPZIONALE**

Determinare le condizioni finali  $T_4$  e  $x_4$  se, a partire dalle condizioni 1, il fluido viene fatto laminare (*trasformazione irreversibile, adiabatica in cui non si raccoglie lavoro utile*) in una valvola fino a pressione  $p_4=1$  bar.

[1680 kW; 1855 kW; 0.945, 247 K; 0.97, 247 K; 0.975, 236 K]

**ESERCIZIO C.3 (1994, gruppo A)**

Un cilindro, dotato di un pistone per cui si possono trascurare massa e attrito con la parete, contiene una massa  $M=0.05$  kg di azoto nelle seguenti condizioni iniziali:

$p_1=2$  bar  $T_1=300$  K.

Il sistema subisce la seguente trasformazione ciclica:

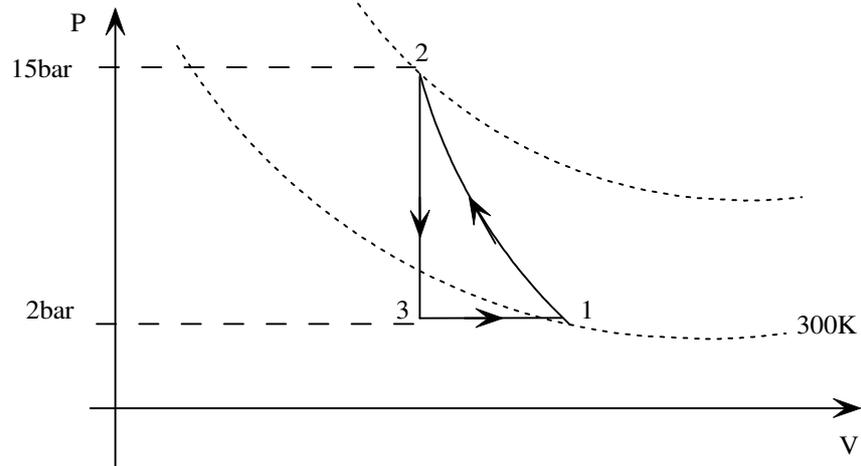
- 1-2 compressione adiabatica fino a  $p_2=15$  bar;
- 2-3 espansione isovolumica fino a  $p_3=p_1$ .
- 3-1 dilatazione isobara fino a tornare nelle condizioni iniziali.

Assumendo di poter considerare il fluido un gas ideale con calore specifico costante, tracciare (approssimativamente) uno schema del ciclo sul diagramma  $p-v$  e determinare:

- a. il valore di  $T_2$ ;
  - b. il lavoro scambiato durante la fase 1-2;
  - c. lavoro totale scambiato durante il ciclo;
  - d. il calore totale scambiato durante il ciclo.
- Dati per l'azoto:  $R= 297 \text{ J/kg K}$ ,  $c_p= 1041 \text{ J/kg K}$ ,  $k=1.40$ .  
 [534 K; -8705 J; -5300 J; -5300 J]

**Soluzione (redatta dallo studente Andrea Cosentino)**

Rappresentiamo la trasformazione sul piano  $p-v$ :



Il valore della temperatura al punto 2 si ricava immediatamente tramite la legge dell'adiabatica reversibile per un gas ideale per cui si ha:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{R/c_p} \approx 533.8 \text{ K}$$

Ci calcoliamo il lavoro nella trasformazione 1-2:

$$\begin{aligned} du &= dq - dl \\ dq &= 0 \\ du &= -dl \\ du &= c_v dt \\ c_v dt &= -dl \end{aligned}$$

ci ricaviamo  $c_v$ :

$$\begin{aligned} c_v &= c_p - R = 744 \text{ J/kg} \\ l_{12} &= c_v (T_2 - T_1) = -174 \text{ kJ/kg} \\ L_{12} &= l_{12} \cdot M = -8.70 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Mentre il lavoro totale nella trasformazione ciclica è dato dalla somma dei tre contributi 1-2 2-3 3-1: mettiamo subito in evidenza che il lavoro nel tratto 2-3 è nullo poiché stiamo effettuando una trasformazione isovolumica.

$$l_{13} = \int_3^1 p dv = p(v_1 - v_3) = 68.04 \text{ kJ/kg}$$

$$L_{13} = l_{13} \cdot M = 3402 \text{ J}$$

$$L_t = L_{12} + L_{13} = -5300 \text{ J}$$

I volumi presenti nelle precedenti equazioni si ricavano con le leggi dei gas ideali  $pv = RT$  e tenendo in considerazione che  $v_3=v_2$

Per quanto riguarda il calore scambiato poiché ci troviamo in una trasformazione ciclica di ha:

$$du = dq - dl$$

$$du = 0$$

$$Q_t = L_t$$

### ESERCIZIO C.4 (1994, gruppo B)

Un cilindro, dotato di un pistone per cui si possono trascurare massa e attrito con la parete, contiene una massa  $M=0.02 \text{ kg}$  di elio nelle seguenti condizioni iniziali:

$p_1 = 15 \text{ bar}$   $T_1 = 300 \text{ K}$ .

Il sistema subisce la seguente trasformazione ciclica:

- 1-2 espansione adiabatica fino a  $p_2 = 2 \text{ bar}$ ;
- 2-3 contrazione isobara fino a  $v_3 = v_1$ .
- 3-1 compressione isovolumica fino a tornare nelle condizioni iniziali.

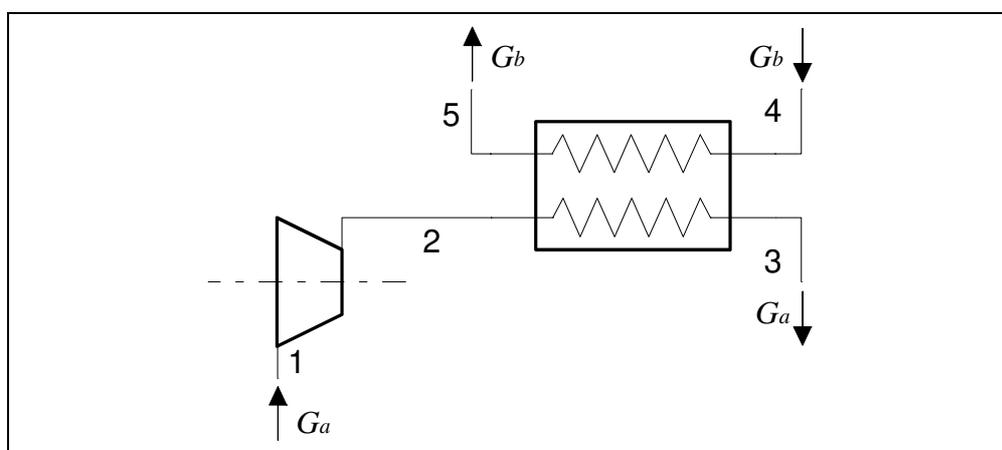
Assumendo di poter considerare il fluido un gas ideale con calore specifico costante, tracciare (approssimativamente) uno schema del ciclo sul diagramma  $p-v$  e determinare:

- a. il valore di  $T_2$ ;
- b. il lavoro scambiato durante la fase 1-2;
- c. lavoro totale scambiato durante il ciclo;
- d. il calore totale scambiato durante il ciclo.

Dati per l'elio:  $R = 2073 \text{ J/kg K}$ ,  $c_p = 5192 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.667$ .

[134 K; 10.3 kJ; 6.46 kJ; 6.46 kJ]

### ESERCIZIO C.5 (1995, gruppo A)



Nel sistema aperto a regime indicato nel diagramma scorrono i seguenti fluidi:

- Ramo 1-2-3:  $G_a = 0.3 \text{ kg/s}$  di R-22 avente le seguenti condizioni:

- punto 1:  $x_1=1, p_1=0.11$  MPa;
- punto 2:  $T_2=360$  K
- punto 3:  $x_3=0$
- Ramo 4-5:  $G_b=0.4$  kg/s di acqua avente le seguenti condizioni:
- punto 4:  $p_4 = 1$  bar,  $T_4 = 20^\circ\text{C}$ .

La trasformazione 1-2 è adiabatica reversibile (ovvero, isoentropica); la trasformazione 2-3 avviene a pressione costante (ovvero  $p_3 = p_2$ ); la trasformazione 4-5 avviene a pressione costante (ovvero  $p_4 = p_5$ ). La superficie esterna dello scambiatore di calore 2-3-4-5 è rigida ed adiabatica.

Determinare:

- la temperatura  $T_1$ ;
- La potenza assorbita dal compressore,  $W'_{12}$ ;
- la pressione  $p_2$ ;
- la potenza termica scambiata tra i due fluidi nello scambiatore,  $W_{t,23}$ ;
- la temperatura di uscita dell'acqua  $T_5$ .

Tracciare inoltre la trasformazione 1-2-3 sul diagramma  $p-h$  dell'R22.

[235 K; -20.6 kW; 1.53 MPa; -62.5 kW; 57.4°C]

**Soluzione (redatta dallo studente Andrea Cosentino)**

*Analisi lato compressore:*

I dati dell'R22 sono riportati in tabella, nella quale i dati di input sono stati evidenziati:

	$p$ [MPa]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kgK]	$x$
1	0.11	-39	233.7	0.9978	1
2 <sub>i</sub>	1.53	86.85	302.4	0.9978	
3	1.53	39.89	94.13	0.3413	0

Calcoliamo la potenza raccolta all'asse del compressore tramite l'equazione di bilancio energetico:

$$W_m' = 0.3(233.7 - 302.4) \approx -20.61 \text{ kW}$$

*Analisi lato scambiatore:*

si è ricavato  $h_3 = 94.13$  kJ/kg per cui si ricava una potenza termica scambiata pari a:

$$W_t = G(h_3 - h_2) = 0.3(94.13 - 302.4) \approx -62.5 \text{ kW}$$

ed infine la temperatura di uscita dell'acqua è data da

$$T_5 = T_4 + |W_t| / (G c_p) = 20 + 62.5 / (0.4 \cdot 4.18) = 57.4^\circ\text{C}$$

□

**ESERCIZIO C.6 (1995, gruppo A, facoltativo)**

Determinare le condizioni finali del fluido R-22 prelevato nelle condizioni  $T_6 = 460$  K,  $p_6 = 5$  MPa se lo stesso viene fatto espandere attraverso una valvola (dispositivo dalla superficie rigida schematizzabile come adiabatico) fino alla pressione atmosferica ( $p_7 = 100$  kPa). Le variazioni di energia cinetica e potenziale possono essere considerate trascurabili. Tracciare la trasformazione 6-7 sul diagramma allegato.

[la trasformazione è isoentalpica; la temperatura finale vale circa 425 K]

**ESERCIZIO C.7 (1995, gruppo A)**

In un sistema chiuso cilindro pistone con rapporto di compressione volumetrico  $r_v = V_3/V_1 = 20:1$  dell'aria (approssimabile come un gas ideale a  $c_p$  costante, con  $R = 287 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.400$ ) avente le seguenti condizioni iniziali:

$$p_1 = 35 \text{ bar}, V_1 = 20 \text{ cm}^3, T_1 = 700 \text{ K};$$

subisce le trasformazioni reversibili indicate nel seguito:

1-2: riscaldamento isobaro con  $q_{12} = 700 \text{ kJ/kg}$ ;

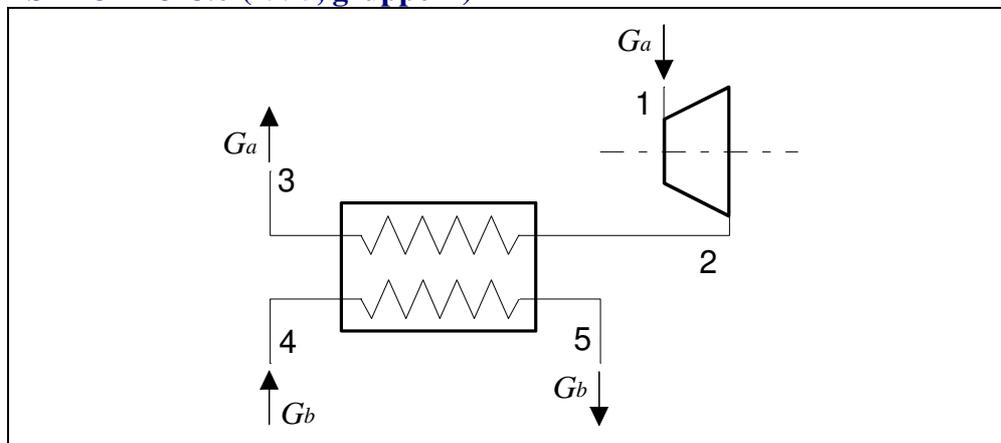
2-3: espansione adiabatica reversibile.

Determinare:

- il lavoro totale scambiato nella fase 1-2,  $L_{12}$ ;
- la temperatura e il volume specifico nel punto 2 ( $T_2, v_2$ );
- il lavoro totale scambiato nella trasformazione 2-3,  $L_{23}$ ;
- la temperatura e la pressione nel punto 3 ( $T_3, p_3$ ).

[70 J; 1397 K, 0.115 m<sup>3</sup>/kg; 210 J; 556 K, 0.14 MPa]

**ESERCIZIO C.8 (1995, gruppo B)**



Nel sistema aperto a regime indicato nel diagramma scorrono i seguenti fluidi:

- Ramo 1-2-3:  $G_a = 15 \text{ kg/s}$  di vapor d'acqua avente le seguenti condizioni:

punto 1:  $T_1 = 900 \text{ K}$ ,  $p_1 = 1.2 \text{ MPa}$ ;

punto 2:  $x_2 = 1$

punto 3:  $x_3 = 0$

- Ramo 4-5: Una portata incognita  $G_b$  di acqua avente le seguenti condizioni:

punto 4:  $p_4 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_4 = 20^\circ\text{C}$ .

punto 5:  $p_5 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_5 = 25^\circ\text{C}$ .

La trasformazione 1-2 è adiabatica reversibile (ovvero, isoentropica); la trasformazione 2-3 avviene a pressione costante (ovvero  $p_3 = p_2$ ). La superficie esterna del condensatore (scambiatore di calore) 2-3-4-5 è rigida ed adiabatica.

Determinare:

- La potenza erogata dalla turbina,  $W_{12}$ ;
- la pressione  $p_2$ ;
- la temperatura  $T_2$  (dare una stima);
- la potenza termica scambiata tra i due fluidi nello scambiatore,  $Q_{23}$ ;
- la portata di acqua necessaria perché la temperatura di uscita sia limitata a  $25^\circ\text{C}$ .

Tracciare inoltre la trasformazione 1-2-3 sul diagramma allegato.

[17.4 MW; 16 kPa; 350 K; -35.3 MW; 1690 kg/s]

**ESERCIZIO C.9 (1995, gruppo B, facoltativo)**

Determinare le condizioni finali del fluido prelevato nel punto 1 del problema precedente se lo stesso viene fatto espandere attraverso una valvola (dispositivo dalla superficie rigida schematizzabile come adiabatico) fino alla pressione atmosferica ( $p_6 = 100 \text{ kPa}$ ). Le variazioni di energia cinetica e potenziale possono essere considerate trascurabili. Tracciare la trasformazione 1-6 sul diagramma allegato.

[la trasformazione è isoentalpica; la temperatura rimane pressochè invariata]

**ESERCIZIO C.10 (1995, gruppo B)**

In un sistema chiuso cilindro pistone con rapporto di compressione volumetrico  $r_v = V_1/V_2 = 12:1$  dell'azoto (approssimabile come un gas ideale a  $c_p$  costante, con  $R = 296.8 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.400$ ) avente le seguenti condizioni iniziali:

$$p_1 = 1 \text{ bar}, V_1 = 400 \text{ cm}^3, t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C};$$

subisce le trasformazioni reversibili indicate nel seguito:

1-2: compressione politropica con  $n = 1.2$ ;

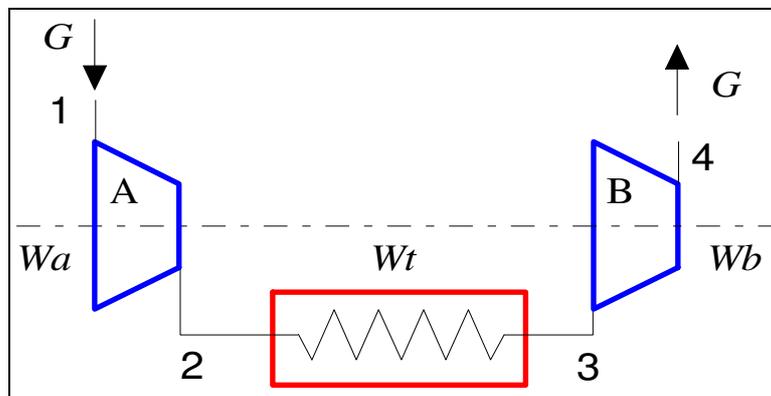
2-3: riscaldamento isovolumico con  $q_{23} = 1500 \text{ kJ/kg}$ .

Determinare:

- il lavoro totale scambiato nella fase 1-2,  $L_{12}$ ;
- il calore totale scambiato nella fase 1-2,  $Q_{12}$ ;
- la temperatura e il volume specifico nel punto 2 ( $T_2, p_2$ );
- la temperatura e la pressione nel punto 3 ( $T_3, p_3$ ).

[-128 J; -63.4 J; 481.8 K, 1.97 MPa; 2495 K, 10.2 MPa]

**ESERCIZIO C.11 (1996, gruppo A)**



Nel sistema aperto a regime rappresentato nella figura scorre una portata  $G = 2.7 \text{ t/h}$  di ammoniaca avente le seguenti condizioni:

punto 1:  $x_1 = 1, p_1 = 2 \text{ bar}$ ;

punto 2:  $p_2 = 7 \text{ bar}$ ;

punto 4:  $T_4 = 360 \text{ K}, p_4 = 14 \text{ bar}$ .

La trasformazione 1-2 è adiabatica reversibile (ovvero, isoentropica);

la trasformazione 2-3 avviene a pressione costante (ovvero  $p_3 = p_2$ ) e durante essa viene ceduta all'esterno una potenza termica  $W_t = -79 \text{ kW}$ .

Tracciare la trasformazione del fluido sul diagramma allegato e determinare:

- 1) La potenza totale necessaria per la compressione ( $W_a + W_b$ )
- 2) le temperature  $T_2$   $T_3$ ;
- 3) la potenza totale necessaria per la compressione nello stadio B nel caso che anche tale compressione avvenga isoentropicamente fino alla stessa pressione finale;
- 4) la temperatura di uscita dell'ammoniaca nell'ipotesi di cui al punto precedente.

[-228 kW; 340 K, 298 K; -75.7 kW; 350 K]

**ESERCIZIO C.12 (1996, gruppo A)**

In un sistema chiuso cilindro pistone con rapporto di compressione volumetrico  $r_v = V_3/V_1 = 4:1$  dell'argon (approssimabile come un gas ideale a  $c_p$  costante, con  $R = 208.2 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.66$ ) avente le seguenti condizioni iniziali:

$$p_1 = 3 \text{ bar}, V_1 = 10 \text{ cm}^3, T_1 = 300 \text{ K};$$

subisce le trasformazioni reversibili indicate nel seguito:

1-2: riscaldamento isovolumico con  $q_{12} = 7 \text{ kJ/kg}$ ;

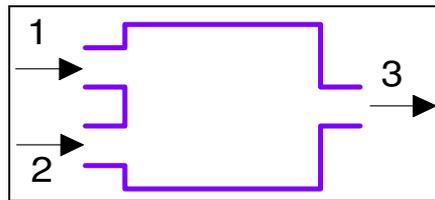
2-3: espansione adiabatica reversibile.

Determinare:

- A) la temperatura e la pressione nel punto 2 ( $T_2, p_2$ );
- B) il lavoro totale scambiato nella trasformazione 2-3,  $L_{23}$ ;
- C) la temperatura e la pressione nel punto 3 ( $T_3, p_3$ ).

[322 K, 3.21 bar; 2.93 J; 129 K, 0.32 bar]

**ESERCIZIO C.13 (1996, gruppo A, facoltativo)**



Uno scambiatore di calore a miscelamento, rappresentato nel diagramma, si trova in condizioni stazionarie ed ha la superficie esterna adiabatica e rigida. In esso scorre ammoniacca avente le seguenti caratteristiche:

punto 1: vapore surriscaldato,  $G_1 = 1.6 \text{ kg/s}$ ,  $p_1 = 2 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 390 \text{ K}$ ;

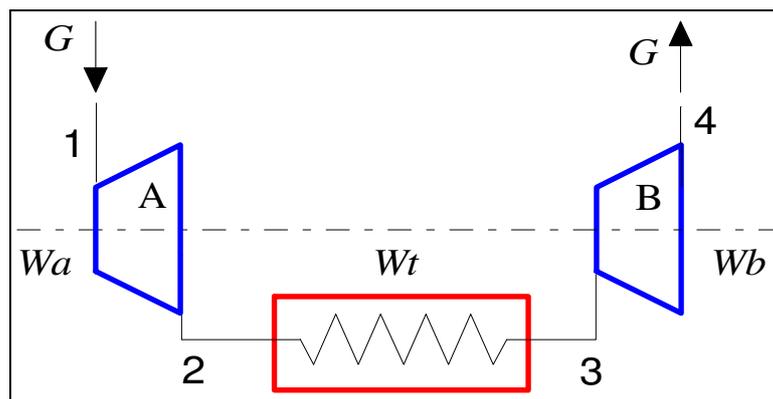
punto 2: liquido sottoraffreddato,  $G_2 = 0.4 \text{ kg/s}$ ,  $p_2 = 0.5 \text{ MPa}$ ,  $h_2 = 220 \text{ kJ/kg}$

punto 3:  $p_3 = 0.5 \text{ MPa}$

Ricavando le proprietà mancanti dal diagramma allegato, determinare la portata e le condizioni termodinamiche (temperatura ed eventualmente titolo) del fluido all'uscita (punto 3).

[2 kg/s; 278 K,  $x=0.93$ ]

**ESERCIZIO C.14 (1996, gruppo B)**



Nel sistema aperto a regime rappresentato nella figura scorre una portata  $G = 8.1 \text{ t/h}$  di acqua avente le seguenti condizioni:

punto 1:  $T_1 = 527 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 10 \text{ MPa}$ ;

punto 2:  $p_2 = 1 \text{ MPa}$

punto 4:  $x_4 = 0.96$ ,  $p_4 = 2 \text{ kPa}$

La trasformazione 1-2 è adiabatica reversibile (ovvero, isoentropica);

la trasformazione 2-3 avviene a pressione costante (ovvero  $p_3 = p_2$ ) e durante essa viene ceduta al fluido una potenza termica  $W_t = 1.3 \text{ MW}$ .

Tracciare la trasformazione del fluido sul diagramma allegato e determinare:

1) La potenza totale erogata dalle due turbine ( $W_a + W_b$ );

2) le temperature  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ;

3) il rendimento isoentropico di espansione dello stadio B;

4) il titolo in uscita nel caso che la espansione nello stadio B avvenga isoentropicamente fino alla stessa pressione finale.

[3.5 MW; 471 K, 771 K, 291 K; 0.85; 0.87]

**ESERCIZIO C.15 (1996, gruppo B)**

In un sistema chiuso cilindro pistone con rapporto di compressione volumetrico  $r_v = V_2/V_1 = 1:12$  dell'anidride carbonica (approssimabile come un gas ideale a  $c_p$  costante, con  $R = 188.99$  J/kg K,  $k = 1.28$ ) avente le seguenti condizioni iniziali:

$$p_1 = 1 \text{ bar}, V_1 = 400 \text{ cm}^3, T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C};$$

subisce le trasformazioni reversibili indicate nel seguito:

1-2: compressione isoterma;

2-3: riscaldamento isovolumico con  $q_{23} = 40$  kJ/kg.

Determinare:

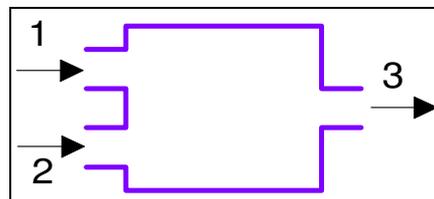
A) il calore ed lavoro totali scambiati nella fase 1-2,  $L_{12}$  e  $Q_{12}$

B) la pressione nel punto 2 ( $p_2$ );

C) la temperatura e la pressione nel punto 3 ( $T_3, p_3$ );

[-96 kJ, -96 kJ; 12 bar; 352 K, 14.4 bar]

**ESERCIZIO C.16 (1996, gruppo B, facoltativo)**



Uno scambiatore di calore a miscelamento, rappresentato nel diagramma, si trova in condizioni stazionarie ed ha la superficie esterna adiabatica e rigida. In esso scorre acqua avente le seguenti caratteristiche:

punto 1: liquido sottoraffreddato,  $G_1 = 0.64$  kg/s,  $p_1 = 1$  bar,  $h_1 = 120$  kJ/kg;

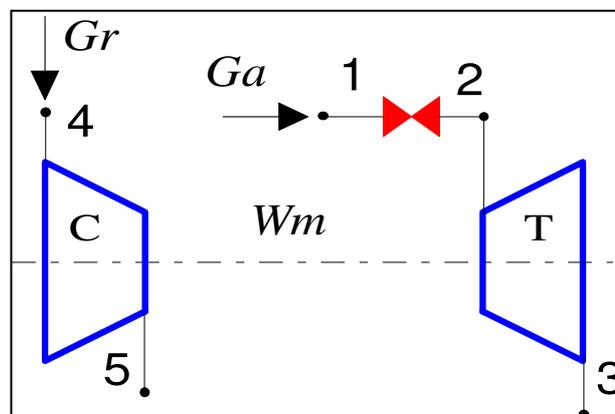
punto 2: vapore surriscaldato,  $G_2 = 1.36$  kg/s,  $p_2 = 200$  bar;  $T_2 = 607$  °C;

punto 3:  $p_3 = 1$  bar

Ricavando le proprietà mancanti dal diagramma allegato, determinare la portata e le condizioni termodinamiche (temperatura ed eventualmente titolo) del fluido all'uscita (pto 3).

[2 kg/s; 227 K, 0.90]

**ESERCIZIO C.17 (1997, gruppo A)**



Nel turbocompressore rappresentato in figura, tutta la potenza meccanica erogata dalla turbina ad aria T viene utilizzata per azionare il compressore C per il fluido R134a, montato coassialmente. L'aria che aziona la turbina viene preventivamente fatta attraversare una valvola di laminazione (che ha superficie esterna rigida ed adiabatica) per ridurne la pressione.

Tutti i componenti possono essere considerati adiabatici, lavorano in condizioni stazionarie e le variazioni di energia cinetica e potenziale sono trascurabili. Sono noti i seguenti dati:

#### Lato turbina

Fluido: aria, approssimabile come gas ideale con  $c_p$  costante ( $R = 287 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.4$ ), portata  $G_a = 0.4 \text{ kg/s}$

- punto 1:  $T_1 = 700 \text{ °C}$ ,  $p_1 = 10 \text{ bar}$ ;
- punto 2:  $p_2 = 6.8 \text{ bar}$ ;
- punto 3:  $p_3 = 1 \text{ bar}$ ;
- rendimento isoentropico della turbina  $\eta_t = 0.85$

#### Lato compressore

Fluido: R-134a (per le proprietà vedi il diagramma allegato).

- punto 4:  $x_4 = 1$ ,  $T_4 = -20 \text{ °C}$ ;
- punto 2:  $p_5 = 7 \text{ bar}$ ;
- rendimento isoentropico del compressore  $\eta_c = 0.8$ .

#### Determinare:

1. Le temperature  $T_2$  e  $T_3$ ;
2. la potenza meccanica erogata dalla turbina ( $W_{mT}$ )
3. la portata di fluido nel compressore,  $G_r$ ;
4. la variazione di entropia dell'aria,  $s_3 - s_1$ ;

Tracciare inoltre, qualitativamente, le trasformazioni dell'aria su un diagramma  $T-s$  e quella dell'R-134a sul diagramma allegato.

[973.15 K, 624 K; 138 kW; 3.25 kg/s; 223.8 J/kg K]

#### **ESERCIZIO C.18 (1997, gruppo A)**

In una tubazione rigida in acciaio di lunghezza  $L = 1 \text{ m}$ , raggio esterno  $R_E = 10 \text{ mm}$  e spessore  $s = 1 \text{ mm}$ , scorre una portata  $G = 0.01 \text{ kg/s}$  di miscela bifase acqua-vapore avente le seguenti caratteristiche in ingresso: pressione  $p_1 = 2 \text{ bar}$  e titolo  $x_1 = 1$ .

Il sistema si trova in condizioni stazionarie. In prima approssimazione, si può trascurare la caduta di pressione e porre in uscita  $p_2 = p_1$ . Anche le variazioni di energia cinetica e potenziale possono essere trascurate. Dato il piccolo valore dello spessore rispetto al raggio, la tubazione può essere approssimata ai fini dello scambio termico come una parete piana di superficie  $A = 2 \pi R_M L$ , dove il raggio medio  $R_M$  è pari a  $R_E - s/2$ . I coefficienti di scambio all'interno ed all'esterno valgono rispettivamente  $\alpha_E = 1200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  e  $\alpha_I = 5000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . La conducibilità termica dell'acciaio vale  $k = 40 \text{ W/m K}$ . La temperatura dell'aria esterna è  $T_E = 20 \text{ °C}$ .

Determinare, utilizzando il diagramma allegato, il titolo del vapore saturo in uscita

[circa 0.73 (la potenza scambiata vale 5.2 kW)]

#### **ESERCIZIO C.19 (1997, entrambi i gruppi, facoltativo)**

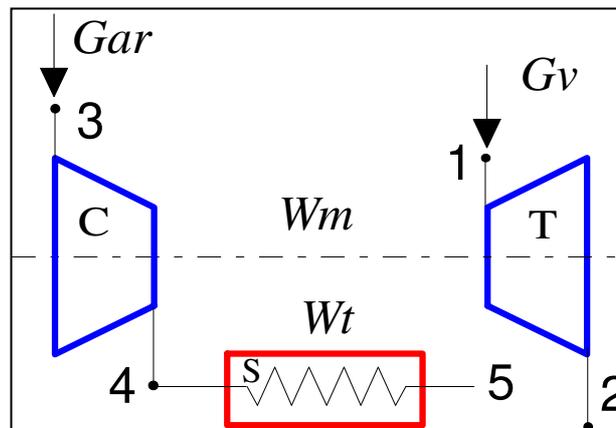
In una turbina adiabatica, in condizioni stazionarie, si espande dell'elio (gas ideale con  $c_p$  costante,  $R = 2077 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.667$ ), dalle condizioni iniziali  $p_1 = 13.6 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 900 \text{ °C}$  alla pressione finale  $p_2 = 1 \text{ bar}$ . La variazione di entropia tra ingresso ed uscita vale  $s_2 - s_1 = 1015 \text{ J/kg K}$ . Determinare il rendimento isoentropico della turbina.

[0.88; le temperature di uscita ideale e reale sono rispettivamente 413 K e 502 K]

#### **ESERCIZIO C.20 (1997, gruppo B)**

Nel turbocompressore rappresentato in figura, tutta la potenza meccanica erogata dalla turbina a vapore T viene utilizzata per azionare il compressore C per argon, montato coassialmente. L'argon in uscita dal compressore viene successivamente refrigerato isobaricamente fino a

riportarlo alla temperatura  $T_3$ . Turbina e compressore possono essere considerati adiabatici, lo scambiatore ha pareti rigide. Il complesso lavora in condizioni stazionarie e le variazioni di energia cinetica e potenziale sono trascurabili. Sono noti i seguenti dati:



**Lato turbina**

Fluido: vapore acqueo (per le proprietà vedi il diagramma allegato).

- punto 1:  $T_1 = 400\text{ °C}$ ,  $p_1 = 40\text{ bar}$ ;
- punto 2:  $p_2 = 1\text{ bar}$ ;
- rendimento isoentropico della turbina  $\eta_t = 0.8$

**Lato compressore**

Fluido: argon approssimabile come gas ideale con  $c_p$  costante ( $R = 208.2\text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.667$ ), portata  $G_{ar} = 0.9\text{ kg/s}$

- punto 3:  $p_3 = 1\text{ bar}$ ,  $T_3 = -20\text{ °C}$ ;
- punto 4:  $p_4 = 4\text{ bar}$ ;
- punto 5:  $p_5 = 4\text{ bar}$ ,  $T_5 = -20\text{ °C}$ ;
- rendimento isoentropico del compressore  $\eta_c = 0.84$ .

**Determinare:**

1. La temperatura  $T_4$ ;
2. la potenza meccanica assorbita dal compressore ( $W_{mC}$ )
3. la potenza termica ceduta nello scambiatore,  $W_i$ ;
4. la portata di vapore necessaria nella turbina,  $G_v$ ;
5. la variazione di entropia dell'argon,  $s_5 - s_3$ ;

Tracciare inoltre, qualitativamente, le trasformazioni dell'argon su un diagramma  $T-s$  e quella del vapore sul diagramma allegato.

[476 K; -104.5 kW; -104.5 kW; 0.22 kg/s; -288.6 J/kg K]

**ESERCIZIO C.21 (1997, gruppo B)**

In una tubazione rigida in rame di lunghezza  $L = 10\text{ m}$ , raggio esterno  $R_E = 7\text{ mm}$  e spessore  $s = 1\text{ mm}$ , scorre una portata  $G = 0.015\text{ kg/s}$  di miscela bifase di R134a avente le seguenti caratteristiche in ingresso: pressione  $p_1 = 2\text{ bar}$  e titolo  $x_1 = 0.3$ .

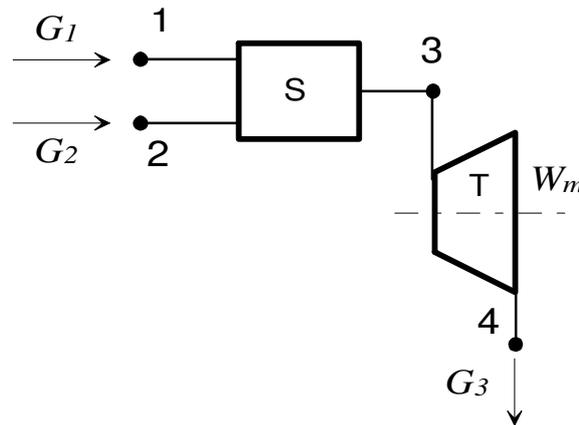
Il sistema si trova in condizioni stazionarie. In prima approssimazione, si può trascurare la caduta di pressione e porre in uscita  $p_2 = p_1$ . Anche le variazioni di energia cinetica e potenziale possono essere trascurate. Dato il piccolo valore dello spessore rispetto al raggio, la tubazione può essere approssimata ai fini dello scambio termico come una parete piana di superficie  $A = 2 \pi R_M L$ , dove il raggio medio  $R_M$  è pari a  $R_E - s/2$ . I coefficienti di scambio all'interno ed all'esterno valgono rispettivamente  $\alpha_E = 230\text{ W/m}^2\text{ K}$  e  $\alpha_I = 5000\text{ W/m}^2\text{ K}$ . La

conducibilità termica del rame vale  $k = 400 \text{ W/m K}$ . La temperatura dell'aria esterna è  $T_E = 20 \text{ °C}$ .

Determinare, utilizzando il diagramma allegato, il titolo del vapore saturo in uscita

[circa 0.6 (la potenza scambiata vale 0.9 kW)]

**ESERCIZIO C.22 (1998)**



La turbina a vapore adiabatica rappresentata in figura lavora in condizioni stazionarie ed è alimentata da vapore surriscaldato che viene precedentemente regolato in temperatura iniettando acqua fredda nello scambiatore a miscelamento a monte della turbina stessa. Sono noti i seguenti dati:

- punto 1:  $T_1 = 20 \text{ °C}$ ,  $p_1 = 200 \text{ bar}$ ;
- punto 2:  $T_2 = 650 \text{ °C}$ ,  $p_2 = 200 \text{ bar}$  ;  $G_2 = 0.8 \text{ kg/s}$
- punto 3:  $T_3 = 600 \text{ °C}$ ,  $p_3 = 200 \text{ bar}$ ;
- punto 4:  $p_4 = 1 \text{ bar}$ ;
- rendimento isoentropico della turbina  $\eta_t = 0.89$

**Determinare:**

5. La portata di acqua necessaria,  $G_1$  ;
6. la potenza meccanica erogata dalla turbina ( $W_{mT}$ )
7. le condizioni (temperatura  $T_4$  ed eventualmente titolo  $x_4$ ) del vapore in uscita.
8. L'entropia del vapore in uscita,  $s_4$ .

Tracciare inoltre, la trasformazione 2-3-4 del vapore sul diagramma allegato.

La tabella seguente riporta le proprietà del fluido nei punti 1-4, più quelle del punto 4i in cui terminerebbe la espansione ideale (adiabatica e reversibile), il cui stato è definito dalla pressione  $p_4$  e da  $s_{4i}=s_3$ . Per l'acqua in ingresso, l'entalpia può anche essere stimata con sufficiente approssimazione con  $h = c_p T = 4.2 \cdot 20 = 84 \text{ kJ/kg}$ .

**Soluzione**

Dati per il vapore nelle condizioni richieste (i valori di input sono evidenziati in grigio)

	$T$	$p$	$v$	$u$	$h$	$s$	$x$	
	°C	MPa	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K		
1.	20	20	0.000928	82.75	102.6	0.2922		Compressed Liquid
2.	650	20	0.01969	3281	3675	6.658		Dense Fluid (T>TC)
3.	600	20	0.01818	3174	3538	6.505		Dense Fluid (T>TC)
4i.	99.62	0.1	1.455	2211	2357	6.505	0.8589	Liquid Vapor Mixture
4	99.62	0.1	1.55	2332	2487	6.854	0.917	

Dati di saturazione alla pressione di 1 bar

	99.62	0.1	0.001043	417.3	417.4	1.303	0	Saturated Liquid
	99.62	0.1	1.694	2506	2675	7.359	1	Saturated Vapor

Il bilancio dello scambiatore di calore a miscelamento risulta in

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

da cui si calcola facilmente la portata di acqua,  $G_1 = G_2 \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = 0.032 \text{ kg/s}$

Notare che il rapporto tra le portate è indipendente dal cognome dello studente. La potenza erogata dalla turbina è data da

$$W'_m = G_3 (h_3 - h_4) = \eta_t (G_1 + G_2) (h_3 - h_{4i}) = 874.4 \text{ kW}$$

La entalpia nel punto 4 può essere ricavata dalla definizione di rendimento isoentropico.

$$\eta_T = \frac{h_4 - h_3}{h_{4i} - h_3} \Rightarrow h_4 = h_3 + \eta_T (h_{4i} - h_3)$$

Nota quest'ultima e la pressione in uscita, è possibile ricavare (dal diagramma o dalle tabelle) le altre proprietà del vapore. In particolare per il titolo si ha:

$$x_4 = \frac{h_4 - h_l}{h_v - h_l} = 0.917$$



**ESERCIZIO C.23 (1998)**

Una parete piana in lamiera di acciaio (di conducibilità termica  $k_p = 40 \text{ W/m K}$ ) di superficie  $A = 11.8 \text{ m}^2$ , di spessore  $s_p = 1 \text{ mm}$ , separa due ambienti a temperatura rispettivamente  $T_I = 20 \text{ °C}$  e  $T_E = -5 \text{ °C}$ . I coefficienti di scambio all'esterno ed all'interno valgono rispettivamente  $\alpha_E = 40 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  e  $\alpha_I = 15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Il sistema si trova in condizioni stazionarie e lo scambio termico può essere considerato monodimensionale. Determinare:

1. lo spessore di materiale isolante  $s_{is}$  (di conducibilità termica  $k_{is} = 0.1 \text{ W/m K}$ ) che è necessario mettere sulla faccia esterna della parete per limitare la potenza termica scambiata attraverso la parete stessa al valore  $W_t = 1.18 \text{ kW}$ ;
2. la temperatura  $T'$  della faccia interna dello strato di isolante.

**Soluzione**

La conduttanza e la resistenza termica di parete sono date da

$$U = \frac{W_t}{T_I - T_E} \Rightarrow R_T = \frac{T_I - T_E}{W_t}$$

e per una parete piana la resistenza termica totale può essere ottenuta sommando le resistenze termiche in serie:

$$R_T = (R_I + R_p + R_{is} + R_E) = \left( \frac{1}{A \alpha_I} + \frac{s_p}{A k_p} + \frac{s_{is}}{A k_{is}} + \frac{1}{A \alpha_E} \right)$$

L'equazione suddetta contiene come unica incognita lo spessore dell'isolante che è dato da

$$s_{is} = k_{is} \left[ A R_T - \left( \frac{1}{\alpha_I} + \frac{s_p}{k_p} + \frac{1}{\alpha_E} \right) \right] = 0.0158 \text{ m}$$

Infine, la temperatura della faccia interna della parete è ottenibile come

$$\frac{T_i - T'}{W_t} = \frac{1}{A \alpha_I} + \frac{s_p}{A k_p} \Rightarrow T' = T_i - \frac{W_t}{A} \left( \frac{1}{\alpha_I} + \frac{s_p}{k_p} \right) = 13.3^\circ\text{C}$$

□

**ESERCIZIO C.24 (1998)**

Una superficie orizzontale di area  $A = 0.28 \text{ m}^2$  ed emissività  $\varepsilon = 0.19$  irraggia verso il cielo sereno notturno (temperatura  $T_c = -40^\circ\text{C}$ ). Il coefficiente di convezione tra aria e superficie vale  $\alpha = 14.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . La parte inferiore della superficie è adiabatica. Determinare il valore della temperatura dell'aria  $T_a$  per cui la superficie, in condizioni stazionarie, si trova a  $T_s = 0^\circ\text{C}$ . La costante di Stefan-Boltzmann vale  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

**Soluzione**

La superficie, in equilibrio termico, riceve calore per convezione dall'aria circostante e lo dissipa verso il cielo.

Il bilancio energetico risulta in

$$A \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_c^4) = \alpha A (T_a - T_s)$$

il risultato è indipendente dall'area della superficie

$$T_a = T_s + \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_c^4)}{\alpha} = 275.06 \text{ K} = 1.9^\circ\text{C}$$

□

**ESERCIZIO C.25 (1998, facoltativo)**

Si vuole comprimere, in condizioni stazionarie, con un compressore adiabatico di rendimento isoentropico  $\eta_c = 0.935$ , una portata  $G = 0.03 \text{ kg/s}$  di elio (gas ideale con  $c_p$  costante,  $R = 2077 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.667$ ), dalle condizioni iniziali  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  alle condizioni finali  $p_3 = 6.8 \text{ bar}$ ,  $T_3 = 150^\circ\text{C}$ . Determinare la potenza meccanica necessaria e la potenza termica da asportare nel raffreddamento isobaro che segue la compressione. Tracciare qualitativamente le trasformazioni su un diagramma  $T$ - $s$ .

**Soluzione**

Per un compressore a regime e per un gas ideale con calore specifico costante si ha

$$W'_m = -G (h_2 - h_1) = -G c_p (T_2 - T_1)$$

la temperatura di fine compressione può essere ottenuta dalla definizione di rendimento isoentropico

$$\eta_c = \frac{T_{2i} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow$$

$$T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} = 631.2 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_c} = 654.7 \text{ K} = 381.6^\circ\text{C}$$

da cui si ha la potenza meccanica

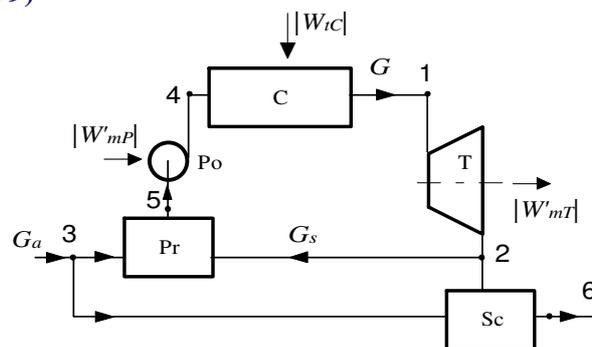
$$W'_m = G c_p (T_1 - T_2) = -56.3 \text{ kW}$$

la potenza termica asportata durante la refrigerazione isobara successiva alla compressione è data da

$$W_t = G (h_3 - h_2) = G c_p (T_3 - T_2) = -36.1 \text{ kW}$$

□

### ESERCIZIO C.26 (1999)



La turbina a vapore adiabatica **T** rappresentata in Figura lavora in condizioni stazionarie ed è alimentata da vapore surriscaldato che viene prodotto nell'insieme caldaia-preriscaldatore (**C**, **Pr**) a monte di essa. Una pompa **Po** (che si può considerare adiabatica) comprime il fluido tra il preriscaldatore e la caldaia. All'uscita della turbina, una parte della portata di vapore viene inviata ad alimentare il preriscaldatore **Pr** (che è uno scambiatore a miscelamento) mentre la rimanente alimenta un secondo scambiatore a miscelamento **Sc** per la produzione di acqua riscaldata. **Pr** ed **Sc** sono adiabatici. Sono noti i seguenti dati:

punto 1:  $T_1 = 470^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 60 \text{ bar}$ ;

punto 2:  $p_2 = 4 \text{ bar}$ ;

punto 3:  $T_3 = 20^\circ\text{C}$ ,  $p_3 = 4 \text{ bar}$ ;

punto 4:  $p_4 = p_1$ ,  $s_4 = s_5$ ;

punto 5:  $p_5 = 4 \text{ bar}$ ,  $x_5 = 0$ ;

punto 6:  $T_6 = 130^\circ\text{C}$ ,  $p_6 = 4 \text{ bar}$ ;

incremento di entropia nella turbina:  $s_2 - s_1 = 0.5 \text{ kJ/kg K}$ ;

potenza meccanica utile all'asse della turbina:  $W'_{mT} = 560 \text{ kW}$ .

**Determinare:**

1. Le condizioni (temperatura  $T_2$  ed eventualmente titolo  $x_2$ ) del vapore in uscita dalla turbina;
2. la portata di vapore necessaria per alimentare la turbina, ( $G$ );
3. il rendimento isoentropico della turbina  $\eta_t$ ;

4. la potenza termica scambiata nella caldaia  $C$  ( $W_{TC}$ );
5. la potenza meccanica assorbita dalla pompa  $Po$  ( $W'_{mP}$ );
6. la portata di vapore che è necessaria per alimentare il preriscaldatore, ( $G_s$ );
7. la portata di acqua di alimento ( $G_a$ ).
8. la quantità di acqua nelle condizioni 6,  $M_6$ , che è possibile produrre in un'ora di funzionamento dell'impianto.

Tracciare inoltre la trasformazione 4-1-2 del vapore sul diagramma  $h-s$ .

### Soluzione

1) Le condizioni in uscita sono determinate dalla coppia di variabili  $p_2, s_2$ ; dal diagramma si ottiene

$$h_2 = 2916 \text{ kJ/kg}, T_2 = 227 \text{ °C}, x_2 = 0.98$$

2) Dalla espressione della potenza della turbina si ottiene direttamente la portata  $G$ , una volta noto il salto entalpico:

$$G = \frac{W'_{mT}}{h_1 - h_2} = \frac{560}{3350 - 2916} = 1.29 \text{ kg/s}$$

3) Il rendimento isoentropico si ottiene confrontando il salto entalpico reale con quello ideale ( $s_{2I} = s_1$ )

$$\eta_T = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2I}} = \frac{3350 - 2916}{3350 - 2693} = 0.66$$

4) La potenza termica scambiata in caldaia, non avendo essa parti in movimento ed essendo quindi nulla la potenza meccanica scambiata è data da

$$W_{TC} = G(h_1 - h_4) = 1.29 \cdot (3350 - 90) = 4205 \text{ kW}$$

notare che  $h_4$  può essere ricavato dalle tabelle o con sufficiente approssimazione da  $h_4 = 4.2 T_4$ .

5) La potenza meccanica assorbita dalla pompa, che è isoentropica, si può ottenere integrando  $-v dp$  per un fluido incomprimibile. Si può assumere  $v_5 = v_4 = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$  (volume del liquido saturo a 4 bar).

$$W'_{mP} = -G v_4 (p_4 - p_5) = -1.29 \cdot 0.0011 \cdot (6000 - 400) = -7.9 \text{ kW}$$

6) Dai bilanci di massa ed energia del preriscaldatore si ottiene

$$G = G_s + G_3 \Rightarrow G_3 = G - G_s$$

$$G h_5 = G_s h_2 + G_3 h_3 \Rightarrow G h_5 = G_s h_2 + (G - G_s) h_3$$

da cui infine

$$G_s = G \frac{h_5 - h_3}{h_2 - h_3} = 1.29 \frac{605 - 84}{2916 - 84} = 0.237 \text{ kg/s}$$

7) La portata di acqua di alimento si può determinare semplicemente dal bilancio globale di energia dell'intero sistema:

$$0 = W_{iC} - W'_{mP} - W'_{mT} + G_a (h_3 - h_6)$$

$$G_a = \frac{W_{iC} - W'_{mP} - W'_{mT}}{h_6 - h_3} \cong \frac{W_{iC} - W'_{mT}}{c(T_6 - T_3)} = \frac{4208 - 560}{4.2 \cdot (130 - 20)} = 7.9 \text{ kg/s}$$

dove di nuovo si può porre  $h_6 = 4.2 T_6$ . e trascurare la potenza della pompa.

8) Dal bilancio di massa dell'intero sistema segue che  $G_6 = G_a$  per cui

$$M_6 = G_6 t = 7.9 \cdot 3600 = 28.5 \text{ t}$$



**ESERCIZIO C.27 (1999)**

Il filo cilindrico di una resistenza elettrica, di diametro  $D = 1.07 \text{ mm}$  e lunghezza  $L = 1.5 \text{ m}$ , ha una temperatura superficiale di lavoro  $T_s = 700 \text{ }^\circ\text{C}$  ed una emissività  $\epsilon = 0.87$ . Esso è raffreddato da aria in convezione naturale alla temperatura  $T_A = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  con un coefficiente di scambio  $\alpha = (5 + 0.5N) \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . ed è circondato da pareti opache alla temperatura  $T_P = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Determinare la corrente che passa nel filo se la sua resistenza elettrica è  $R_e = 10 \text{ Ohm}$  (come è noto, la potenza dissipata per effetto Joule è data da  $W = RI^2$ ).

**Soluzione**

La potenza dissipata è data da

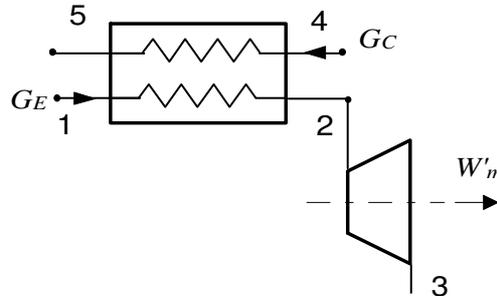
$$W_T = A \epsilon \sigma (T_s^4 - T_p^4) + \alpha A (T_s - T_a) =$$

$$= 0.005042 \cdot [0.87 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (973.15^4 - 283.15^4) + 14.5 \cdot (700 - 20)] = 271.19 \text{ W}$$

$$I = \sqrt{\frac{W_T}{R}} = \sqrt{\frac{271.19}{10}} = 5.21 \text{ A}$$



**ESERCIZIO C.28 (1999, facoltativo)**



La turbina adiabatica rappresentata in figura lavora in condizioni di regime ed ha rendimento isoentropico  $\eta_t = 0.95$ . Essa è alimentata di elio (gas ideale con  $c_p$  costante,  $R = 2077 \text{ J/kg K}$ ,  $k = 1.667$ ) alla pressione e temperatura di ingresso nello scambiatore  $p_1 = 20 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  e nella turbina  $p_2 = 20 \text{ bar}$ ,  $T_2 = 830 \text{ }^\circ\text{C}$ , pressione di uscita dalla turbina  $p_3 = 4 \text{ bar}$ . L'elio viene riscaldato in uno scambiatore, il cui lato primario è alimentato con una portata  $G = 1.1 \text{ kg/s}$  gas di combustione ( $c_p = 1100 \text{ J/kg K}$ , costante) che in ingresso ha pressione e temperatura  $p_4 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_4 = 1380 \text{ }^\circ\text{C}$  ed esce dallo scambiatore alla temperatura  $T_5 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_5 = p_4$ . Determinare 1) la portata di elio  $G_E$ , 2) la sua temperatura di uscita dalla turbina  $T_3$ , 3) la potenza erogata dalla turbina  $W'_m$ . Tracciare qualitativamente le trasformazioni dell'elio su un diagramma  $T-s$  schizzato a mano.

**Soluzione**

1) Dal bilancio dello scambiatore di calore si ottiene la portata di elio

$$G_C (h_4 - h_5) = G_E (h_2 - h_1)$$

$$G_E = G_C \frac{h_4 - h_5}{h_2 - h_1} = G_C \frac{c_{pC} (T_4 - T_5)}{c_{pE} (T_2 - T_1)} = 1.1 \frac{1100(1380 - 300)}{5191(830 - 100)} = 0.345 \text{ kg/s}$$

2) Le temperature di uscita ideale e reale valgono rispettivamente, per  $\eta_T = 0.95$ :

$$T_{3i} = T_2 \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{R}{c_p}} = 1103 \left( \frac{4}{20} \right)^{0.4} = 579 \text{ K}$$

$$T_3 = T_2 - (T_2 - T_{3i}) \eta_T = 605 \text{ K} = 332 \text{ }^\circ\text{C}$$

3) Nella turbina adiabatica e a regime, e per un gas ideale con calore specifico costante, si ha

$$W'_m = G (h_3 - h_2) = G c_p (T_3 - T_2) = 0.345 \cdot 5191 \cdot (830 - 332) = 890.7 \text{ kW}$$



### ESERCIZIO C.29 (2000)

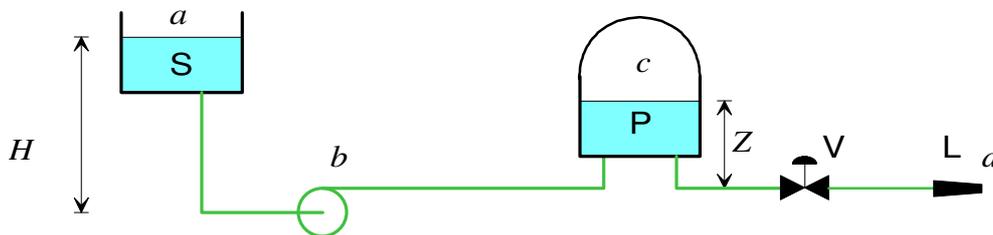
Il circuito idraulico rappresentato in figura è costituito da una pompa che preleva acqua alla temperatura di 20 °C dal serbatoio S (in contatto con l'atmosfera) e la trasferisce, tramite l'accumulatore in pressione P e la valvola V, alla lancia L da cui l'acqua viene espulsa nell'atmosfera alla velocità di 20 m/s. Tra la superficie libera del serbatoio e la lancia vi è una differenza di livello  $H = 11$  m. La portata nel circuito vale  $G = 5$  kg/s; per tutte le tubazioni si può assumere un valore del coefficiente di Darcy  $\lambda = 0.02$ ; si può assumere per l'acqua una densità  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>.

Sono noti i seguenti dati

- Tubazione a-b: lunghezza  $L_{ab} = 4$  m, velocità media del fluido  $w_{ab} = 3.15$  m/s,
- Tubazione b-c: lunghezza  $L_{bc} = 20$  m, diametro  $D_{bc} = 0.8 D_{ab}$ ;
- Tubazione c-d: lunghezza  $L_{cd} = 4$  m, diametro  $D_{cd} = D_{bc}$ .

La valvola V ha un coefficiente di perdita di carico concentrata  $K_v = 6$ . Assumendo dei valori plausibili per i coefficienti di perdita di carico concentrata nelle rimanenti discontinuità rilevabili dal disegno, e trascurando detta perdita per la lancia L, determinare:

1. La prevalenza della pompa  $h'$ ;
2. La potenza resa dalla pompa al fluido  $W_p$ ;
3. La pressione relativa all'interno del polmone P, la cui superficie libera si trova ad un'altezza  $Z = 3$  m superiore rispetto a quella della lancia L.



### Soluzione

Il diametro della tubazione a-b è ottenibile dal valore della portata

$$G = \rho w_{ab} A = \rho w_{ab} \frac{\pi D_{ab}^2}{4}; D_{ab} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \rho w_{ab}}} = 0.045 \text{ m}$$

La velocità  $w_{bc} = w_{cd}$  è ottenibile dall'equazione di continuità

$$w_{ab} \frac{\pi D_{ab}^2}{4} = w_{bc} \frac{\pi D_{bc}^2}{4}; w_{bc} = w_{ab} \frac{D_{ab}^2}{D_{bc}^2} = \frac{w_{ab}}{0.8^2} = 4.92 \text{ m/s}$$

La prima parte del problema (domande 1 e 2) si risolve applicando l'equazione generalizzata di Bernoulli tra le sezioni a e d, tenuto conto che  $p_a = p_d$  e che la velocità sulla superficie libera del serbatoio può essere trascurata

$$\frac{w_d^2}{2g} - H = h' - h_a$$

Le perdite di carico distribuite valgono

$$h_{ad} = \lambda \frac{L_{ab}}{D_{ab}} \frac{w_{ab}^2}{2g} + \lambda \frac{L_{bc}}{D_{bc}} \frac{w_{bc}^2}{2g} + \lambda \frac{L_{cd}}{D_{cd}} \frac{w_{cd}^2}{2g} = 17 \text{ m}$$

Le perdite concentrate (assunto il valore di  $K = 0.5$  per le tre curve a gomito presenti e  $K = 1$  per i tre punti di ingresso/uscita da serbatoio) valgono

$$h_{ac} = 1 \frac{w_{ab}^2}{2g} + 0.5 \frac{w_{ab}^2}{2g} + 0.5 \frac{w_{bc}^2}{2g} + 1 \frac{w_{bc}^2}{2g} + 1 \frac{w_{cd}^2}{2g} + 0.5 \frac{w_{cd}^2}{2g} + 6 \frac{w_{cd}^2}{2g} = 11.87 \text{ m}$$

Si ottiene quindi

$$h' = h_a + \frac{w_d^2}{2g} - H = 38.5 \text{ m}$$

La potenza resa dalla pompa al fluido vale

$$W_p = G g h' = 1.42 \text{ kW}$$

Per la domanda 3 è necessario applicare l'equazione di Bernoulli al solo tratto  $c-d$  di circuito

$$\frac{p_d - p_c}{\gamma} + \frac{w_d^2}{2g} - Z = -h_a$$

dalla quale, considerato che le perdite di carico concentrate e distribuite valgono rispettivamente

$$h_{ac} = 1 \frac{w_{cd}^2}{2g} + 0.5 \frac{w_{cd}^2}{2g} + 6 \frac{w_{cd}^2}{2g} = 9.26 \text{ m}$$

$$h_{ad} = \lambda \frac{L_{cd}}{D_{cd}} \frac{w_{cd}^2}{2g} = 2.7 \text{ m}$$

si ottiene il valore della pressione relativa nel serbatoio:

$$p_c - p_d = \gamma \left( \frac{w_d^2}{2g} - Z + h_a \right) = 305 \text{ kPa}$$

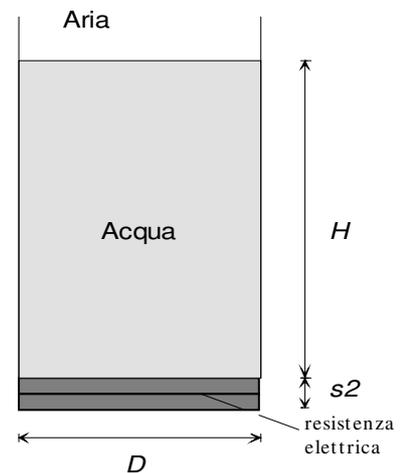
□

### ESERCIZIO C.30 (2000)

Il recipiente cilindrico rappresentato in figura ha diametro  $D = 49 \text{ cm}$  ed altezza  $H = 30 \text{ cm}$ , è riempito di acqua a temperatura  $T_i = 44.6 \text{ °C}$ , ed è mantenuto in comunicazione con l'ambiente esterno, che si trova a temperatura  $T_e = 15 \text{ °C}$ . La parete laterali del recipiente è di acciaio inox ( $k_1 = 16 \text{ W/m K}$ ) di spessore  $s_1 = 3.3 \text{ mm}$ , mentre il fondo è di alluminio ( $k_2 = 200 \text{ W/m K}$ ) di spessore  $s_2 = 20 \text{ mm}$ .

Nel fondo, a distanza uguale dalle due facce dello stesso, è inglobata una resistenza elettrica piana (di spessore trascurabile) che eroga una potenza  $W_e = 2 \text{ kW}$ . Il coefficiente di scambio termico convettivo tra tutte le pareti (incluso il fondo) e l'acqua vale  $\alpha_l = 150 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  e quello tra tutte le pareti (incluso il fondo) e l'aria esterna vale  $\alpha_E = 15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Il contributo dell'irraggiamento è già considerato nel valore dei coefficienti di convezione. Determinare:

1. La potenza termica  $W_p$ , scambiata tra l'acqua del recipiente e l'esterno attraverso la parete laterale.
2. La frazione della potenza  $W_e$  erogata dalla resistenza che viene trasferita all'acqua all'interno del recipiente.
3. L'altezza di cui varia la superficie libera dell'acqua nel recipiente quando la sua temperatura varia da  $20 \text{ °C}$  a  $80 \text{ °C}$ . A tal fine si può assumere un valore medio del



coefficiente di dilatazione isobaro  $\beta = 4.6 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , oppure ricavare gli opportuni dati dalle tabelle termodinamiche dell'acqua.

**Soluzione**

1. La parete del recipiente, dato il piccolo spessore rispetto al diametro, si può schematizzare come una superficie piana lambita da due fluidi di superficie pari a

$$A_p = \pi D H = 0.0461 \text{ m}^2$$

la resistenza termica, assumendo il modello di parete piana lambita da due fluidi, è data da

$$R_p = \frac{1}{\alpha_i A_p} + \frac{s_1}{k_1 A_p} + \frac{1}{\alpha_e A_p} = 0.159 \text{ K/W}$$

quindi la potenza termica scambiata tra interno ed esterno vale

$$W_p = \frac{T_i - T_e}{R_p} = 185 \text{ W}$$

2. Il fondo della pentola è schematizzabile come due resistenze termiche in parallelo, ciascuna costituita dalla resistenza conduttiva di uno strato di alluminio avente spessore pari alla metà di quello del fondo stesso, più la resistenza convettiva verso il fluido che lo lambisce. La potenza termica  $W_p$  si ripartisce tra queste due resistenze. Si ha quindi, detta  $T_r$  la temperatura della resistenza (non richiesta dal problema),  $R_1$  la resistenza termica in direzione dell'acqua,  $R_2$  quella in direzione dell'aria e  $W_1$ ,  $W_2$  le relative potenze termiche scambiate

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_i A_f} + \frac{s_2/2}{k_2 A_f} = 0.036 \text{ K/W} \quad , \quad R_2 = \frac{1}{\alpha_e A_f} + \frac{s_2/2}{k_2 A_f} = 0.354 \text{ K/W}$$

$$W_e = W_1 + W_2 \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{T_r - T_e}{R_2} \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{T_r - T_i}{R_1} \quad (3)$$

eliminando  $T_r$  dalle ultime due equazioni (2), (3) e sostituendo il valore di così ricavato nella precedente equazione (1) si ottiene

$$W_1 = \frac{W_e + (T_i - T_e) / R_2}{1 + R_1 / R_2} = 1741 \text{ W}$$

3. La variazione di volume del fluido può essere ottenuta alternativamente come (gli indici  $i$  ed  $f$  si riferiscono rispettivamente allo stato iniziale e finale)

$$\beta (T_f - T_i) = \ln \frac{V_f}{V_i} \cong \frac{\Delta V}{V_i} \quad ; \quad \Delta V = V_i \beta (T_f - T_i) = 1.56 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

oppure

$$V_f = M v_f \quad ; \quad M = \frac{V_i}{v_i} \quad ; \quad V_f = \frac{v_f}{v_i} V_i \quad ; \quad \Delta V = V_i \left( \frac{v_f}{v_i} - 1 \right) = 1.52 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

La variazione di livello nel recipiente è data da

$$\Delta V = \frac{\pi D_b^2}{4} \Delta L \quad ; \quad \Delta L = \frac{4 \Delta V}{\pi D_b^2} = 8.3 \text{ mm}$$

□

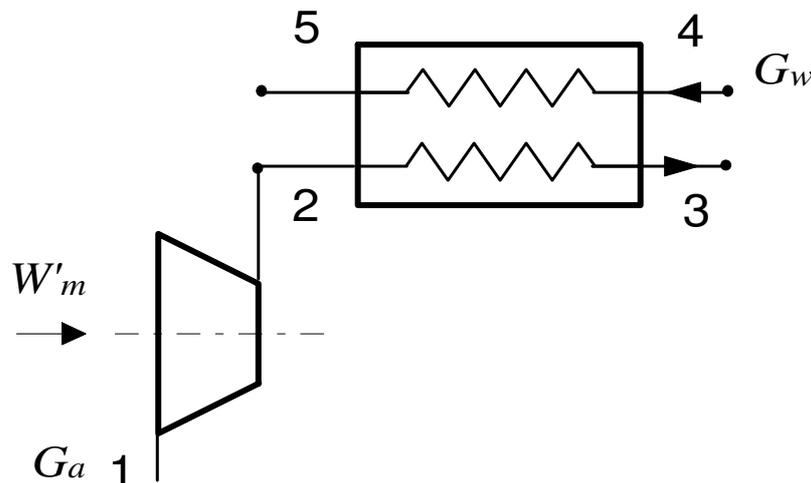
**ESERCIZIO C.31 (2000 - Per l'anno 2000 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Si vuole ottenere una portata di  $G_a = 43 \text{ kg/s}$  di aria a 15 bar e ad una temperatura di  $115 \text{ }^\circ\text{C}$ , prelevando aria atmosferica (pressione di 1 bar) alla temperatura di  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . A tale scopo (vedi figura) si comprime l'aria in un compressore adiabatico, con rendimento isoentropico pari a 0.915, e poi la si refrigera in uno scambiatore di calore a superficie, adiabatico verso l'esterno. Il raffreddamento dell'aria viene ottenuto utilizzando acqua alla pressione di 1 bar ed alla temperatura di ingresso di  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'acqua esce dallo scambiatore in condizioni di vapore saturo con un titolo  $x_5 = 0.93$ . Le trasformazioni nello scambiatore (2-3, 4-5) possono essere considerate isobare.

Si determini:

1. la temperatura dell'aria in uscita dal compressore,  $T_2$ ;
2. la potenza meccanica di compressione  $W'_m$ ;
3. la potenza termica scambiata nello scambiatore di calore tra i due fluidi;
4. la portata d'acqua necessaria per il raffreddamento,  $G_w$ ;
5. Il valore del termine di irreversibilità ( $\dot{S}_{irr}$ ) nel sistema costituito dallo scambiatore.

(Si consideri l'aria come un gas ideale con  $c_p = 1005 \text{ J/(kg K)}$  costante ed  $R = 287 \text{ J/(kg K)}$ )



**Soluzione**

La temperatura ideale e reale in uscita dal compressore sono date rispettivamente da

$$T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{R/c_p} = 656 \text{ K} \quad ; \quad T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_c} = 689 \text{ K}$$

La potenza meccanica necessaria al compressore vale

$$W'_m = G(h_1 - h_2) = G c_p (T_1 - T_2) = -16.71 \text{ MW}$$

e quella ceduta dall'aria all'acqua nello scambiatore

$$W_T = G c_p (T_2 - T_3) = -13.03 \text{ MW}$$

L'entalpia e l'entropia di ingresso e di uscita dell'acqua (ricavabili dalle tabelle o dal diagramma dell'acqua) valgono rispettivamente

$$h_4 = 84.03 \text{ kJ/kg}; \quad h_5 = 2517 \text{ kJ/kg}; \quad s_4 = 0.2965 \text{ kJ/kg K}; \quad s_5 = 6.935 \text{ kJ/kg K};$$

quindi la portata di acqua necessaria è ottenibile dal bilancio energetico dello scambiatore

$$G_w = \frac{G c_p (T_2 - T_3)}{h_5 - h_4} = 5.4 \text{ kg/s}$$

mentre il termine di irreversibilità si ricava dal bilancio entropico dello scambiatore

$$G_a (s_2 - s_3) + G_w (s_4 - s_5) + \dot{S}_{irr} = 0 \quad ;$$

$$\dot{S}_{irr} = G_a (s_3 - s_2) + G_w (s_5 - s_4) = G_a \left( c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2} \right) + G_w (s_5 - s_4) = 11 \text{ kW/K}$$

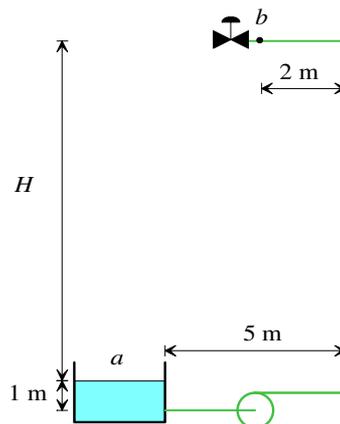
ed essendo positivo indica che la trasformazione è irreversibile.

□

**ESERCIZIO C.32 (2001 - Per l'anno 2001 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Per l'impianto antincendio schematizzato in figura, si ha  $H = 24.5$  m. Le prescrizioni impongono che all'attacco della manichetta (punto b) deve arrivare una portata  $G_v = 73$  litri/min di acqua a  $26.9$  °C, alla pressione relativa di 1.5 bar. Ricavando dalle tabelle allegate i dati mancanti, determinare:

1. il diametro della tubazione, in acciaio galvanizzato, selezionato tra quelli unificati della serie standard (v. tabella), per una velocità del fluido non superiore a 2 m/s;
2. la prevalenza della pompa;
3. la potenza resa al fluido e quella assorbita dalla pompa stessa, ipotizzando per la medesima un rendimento  $\eta_p = 0.65$ .



**Soluzione (redatta da N. Forgione)**

La viscosità e la densità dell'acqua a  $26.9$  °C sono ricavabili per interpolazione lineare dai dati della tabella a 21 e  $66$  °C:

$$\mu = \mu(21) + \frac{26.9 - 21}{66 - 21} [\mu(66) - \mu(21)] = 0.978 + \frac{26.9 - 21}{66 - 21} [0.434 - 0.978] = 0.9067 \text{ mPa s}$$

$$\rho = \rho(21) + \frac{26.9 - 21}{66 - 21} [\rho(66) - \rho(21)] = 997 + \frac{26.9 - 21}{66 - 21} [979 - 997] = 994.64 \text{ kg/m}^3$$

Il diametro minimo della tubazione è ottenibile dal valore della portata volumetrica, dopo aver convertito la portata in unità SI ( $G_v = 1.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ )

$$G_v = w_{\max} A = w_{\max} \frac{\pi D_{\min}^2}{4} \quad ; \quad D_{\min} = \sqrt{\frac{4 G_v}{\pi w_{\max}}} = 0.0279 \text{ m} = 27.9 \text{ mm}$$

Il diametro deve essere quindi portato al valore immediatamente superiore tra quelli interni disponibili in tabella ovvero ad  $1\frac{1}{4}$ ", a cui corrisponde un diametro interno effettivo di  $D_{eff} = 0.03508$  m

La velocità  $w$  deve quindi essere ricalcolata per il valore effettivo del diametro della tubazione

$$w = \frac{G_v}{A} = \frac{4G_v}{\pi D_{eff}^2} = 1.26 \text{ m/s}$$

La prevalenza della pompa si determina applicando l'equazione generalizzata di Bernoulli tra le sezioni  $a$  e  $b$ , tenuto conto che la velocità sulla superficie libera del serbatoio può essere trascurata e che  $p_a = p_{atm}$

$$\frac{p_b - p_a}{\gamma} + \frac{w_b^2}{2g} + H = h' - h_a$$

tenendo conto che  $p_b - p_a$  rappresenta appunto la pressione relativa nel punto  $b$ , ovvero 1.5 bar = 150000 Pa.

Il coefficiente di Darcy può essere determinato con la formula di Haaland una volta noti il numero di Reynolds e la rugosità relativa che valgono

$$Re = \frac{\rho w D_{eff}}{\mu} = 48488; \quad \varepsilon = 150 \text{ } \mu\text{m}, \text{ da cui}$$

$$\lambda = \left\{ -0.782 \ln \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D_{eff}} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} = 0.0309$$

Le perdite di carico distribuite lungo i 32.5 m di tubo valgono dunque  $h_{ad} = \lambda \frac{L}{D_{eff}} \frac{w^2}{2g} = 2.32 \text{ m}$

Le perdite concentrate (assunto il valore di  $K = 0.5$  per le due curve a gomito presenti e  $K = 1$  per il punto di uscita dal serbatoio) valgono

$$h_{ac} = 1 \frac{w^2}{2g} + 0.5 \frac{w^2}{2g} + 0.5 \frac{w^2}{2g} = 0.16 \text{ m}$$

Si noti che la valvola in uscita non deve essere considerata perché esterna al sistema.

$$\text{Si ottiene quindi infine } h' = h_a + \frac{p_b - p_{atm}}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} + H = 42.43 \text{ m}$$

La potenza resa dalla pompa al fluido vale  $W_p = G g h' = 0.50 \text{ kW}$

$$\text{e quella assorbita } W_{ass} = \frac{W_p}{\eta_p} = 0.78 \text{ kW}$$

□

**ESERCIZIO C.33 (2001 - Per l'anno 2001 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Una portata volumetrica  $G_{v1} = 23 \text{ m}^3/\text{h}$  di aria alla pressione  $p_1 = 60 \text{ bar}$  ed alla temperatura  $T_1 = 49 \text{ }^\circ\text{C}$  viene introdotta alla velocità  $w_1 = 206 \text{ m/s}$  in un diffusore, da cui esce alla velocità  $w_2 = 20 \text{ m/s}$ . Il processo è stazionario e reversibile, e le pareti del diffusore sono adiabatiche e rigide. Determinare:

1. la portata in massa nel dispositivo;
2. il numero di Mach in ingresso,  $M_1$ ;
3. la temperatura di uscita dell'aria e la sua pressione,  $T_2, p_2$ ;
4. la portata volumetrica in uscita  $G_{v2}$ ;
5. la sezione di ingresso e di uscita del diffusore ( $A_1, A_2$ ).

Si consideri l'aria come un gas ideale con  $c_p = 1005 \text{ J/kg K}$  costante ed  $R = 287 \text{ J/kg K}$ .

**Soluzione (redatta da N. Forgione)**

Il volume specifico in ingresso è dato da  $v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = 0.0154 \text{ m}^3/\text{kg}$ , per cui la portata massica

$$\text{vale } G = \frac{G_{v,1}}{v_1} = 0.415 \text{ kg/s}$$

La velocità del suono in ingresso è data da  $c_1 = \sqrt{k RT_1} = \sqrt{\frac{c_p}{c_p - R} RT_1} = 359.74 \text{ m/s}$

Ed il numero di Mach vale quindi  $M_1 = \frac{w_1}{c_1} = 0.573$

Il bilancio di energia si scrive come

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2}$$

da cui, sfruttando l'ipotesi di gas ideale, si ottiene la temperatura in uscita

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{2c_p} (w_1^2 - w_2^2) = 69.91 \text{ }^\circ\text{C}$$

La pressione in uscita si può derivare dall'espansione isoentropica di un gas ideale

$$p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{c_p/R} = 74.78 \text{ bar}$$

e quindi il volume in uscita è dato da  $v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = 0.0132 \text{ m}^3/\text{kg}$ ;

La portata volumetrica in uscita vale  $G_{v,2} = G v_2 = 0.0055 \text{ m}^3/\text{s}$

Le sezioni in ingresso ed in uscita sono date da  $A_1 = \frac{G_{v,1}}{w_1} = 3.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ;

$$A_2 = \frac{G_{v,2}}{w_2} = \frac{G v_2}{w_2} = 27.39 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

□

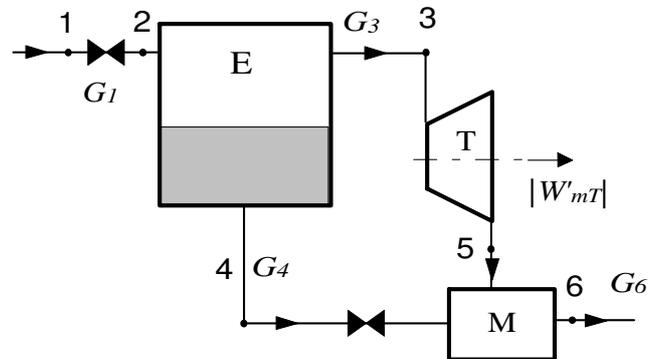
**ESERCIZIO C.33 (2001 - Per l'anno 2001 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Nell'impianto schematizzato in Fig.2, una portata  $G_1 = 0.43 \text{ kg/s}$  di acqua proveniente da una sorgente geotermica, alla pressione  $p_1 = 100 \text{ bar}$  ed alla temperatura  $T_1 = 291 \text{ }^\circ\text{C}$ , viene fatta espandere irreversibilmente in un evaporatore a flash° (E) per ottenere vapore saturo secco ( $x_3 = 1$ ) alla pressione  $p_3 = 60 \text{ bar}$ , che viene inviato ad una turbina (T) con rendimento isoentropico di espansione  $\eta_t = 0.93$ , in cui si espande fino alla pressione  $p_5 = 200 \text{ kPa}$ . Il liquido saturo ( $x_4 = 0$ ,  $p_4 = 60 \text{ bar}$ ) che viene scaricato alla base dell'evaporatore viene laminato, miscelato adiabaticamente nel miscelatore (M) con il vapore in uscita dalla turbina ed inviato (alla pressione  $p_6 = p_5 = 200 \text{ kPa}$ ) ad un impianto di teleriscaldamento. Il sistema è a regime e tutti i suoi componenti sono adiabatici; le pareti dell'evaporatore e del miscelatore e delle valvole di laminazione sono rigide. Determinare:

1. la portata di vapore all'ingresso turbina,  $G_3$  ;
2. la portata di liquido scaricata dall'evaporatore,  $G_4$  e la sua temperatura,  $T_4$ ;
3. la potenza meccanica erogata dalla turbina,  $W'_{mt}$ ;
4. il titolo e la temperatura in uscita alla turbina  $x_5$ ,  $T_5$ ;

5. la portata, l'entalpia e la temperatura ed il titolo ( $G_6, h_6, T_6, x_6$ ) del fluido in uscita dal punto 6.
6. la massima potenza meccanica teoricamente ottenibile dal sistema (secondo l'analisi di disponibilità) ed il rendimento di secondo principio dello stesso. Considerare per lo stato morto  $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ .

° un evaporatore a flash è un dispositivo in cui si introduce un liquido sottoraffreddato che, per effetto di una repentina variazione di pressione, evapora parzialmente; la separazione delle fasi avviene per gravità.



**Soluzione (redatta da N.Forgione)**

lo stato in ogni punto). Si ha  $G_1 = 0.43\text{ kg/s}$ ,  $\eta_T = 0.93$ .

punto	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ bar}$	$h, \text{ kJ/kg}$	$s, \text{ kJ/kg K}$	$x$
1	291	100	1292.4	3.1579	-
3	275.6	60	2784.5	5.8896	1
4	275.6	60	1213.7	3.0269	0
5i	120.2	2	2220.3	5.8896	0.779
5	120.2	2	2259.8	5.9913	0.797
6	120.2	2	1266.2	3.4655	0.346

I bilanci di massa ed energia dell'evaporatore (includendovi la valvola di laminazione 1-2) si scrivono rispettivamente come

$$G_1 = G_3 + G_4$$

$$G_1 h_1 = G_3 h_3 + G_4 h_4$$

Da cui tenuto conto che  $h_3 = h_g$  e  $h_4 = h_f$  alla pressione di 60 bar, si può ricavare  $G_3 = G_1 \frac{h_1 - h_f}{h_g - h_f}$

$$= 0.0215\text{ kg/s}$$

$$G_4 = G_1 - G_3 = 0.4085\text{ kg/s}$$

Per quanto riguarda la turbina, come ben noto si ricava innanzi tutto l'entalpia ideale in uscita  $h_{5i}$  imponendo una trasformazione isoentropica, ovvero  $s_3 = s_{5i}$ ; si ha poi

$$h_5 = h_3 - \eta_T (h_3 - h_{5i}) = 2259.8\text{ kJ/kg}$$

$$W'_{mT} = G_3 (h_3 - h_5) = 11.28\text{ kW}$$

noti  $h_5$  e  $p_5$ , si può ricavare il titolo in uscita (v. tabella).

Per i punti 5 e 6 risulta più facile considerare il bilancio dell'intero sistema. Per esso si ha ovviamente per il bilancio di massa

$$G_6 = G_1$$

e per il bilancio di energia  $G_6 h_6 + W'_{mT} = G_1 h_1$ , da cui si ricava  $h_6 = h_1 - \frac{W'_{mT}}{G_1} = 1266.2 \text{ kJ/kg}$

e da questo valore, insieme a quello della pressione  $p_6 = p_5$ , si ricavano le proprietà del punto 6.

Infine, il bilancio di disponibilità per l'intero sistema fornisce

$$W'_{m,a} = G_1 a_{f,1} - G_6 a_{f,6} = G_1 [h_1 - h_6 - T_0 (s_1 - s_6)] = 50.7 \text{ kW}$$

da cui il rendimento di secondo principio vale  $\varepsilon = \frac{W'_{mT}}{W'_{m,a}} = 0.22$



**ESERCIZIO C.34 (2002 - Per l'anno 2002 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

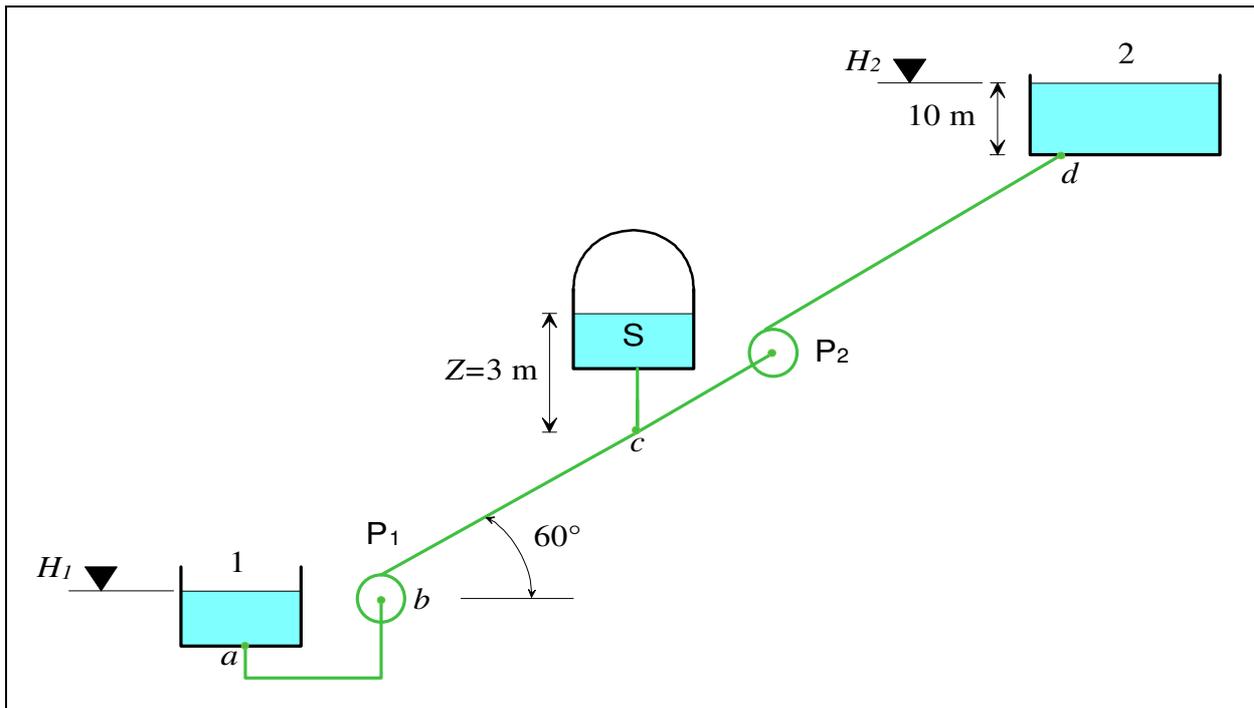
L'impianto di pompaggio rappresentato in figura sfrutta la sovrapproduzione di energia elettrica nelle ore notturne per sollevare una portata di acqua  $G = 100 \text{ t/min}$  alla temperatura di  $20 \text{ °C}$  da un bacino inferiore alla quota  $H_1 = 50 \text{ m}$  ad uno superiore alla quota  $H_2 = 630 \text{ m}$ . La tubazione è costituita da due spezzoni principali di differente diametro,  $b-c$  e  $c-d$ , alla cui congiunzione  $c$  (alla quota  $H_c = 250 \text{ m}$ ) si trova l'accumulatore S, e nei quali sono inserite due pompe  $P_1$  e  $P_2$ . La tubazione è rettilinea e giace lungo un pendio inclinato di  $60^\circ$ .

Sono noti i seguenti dati

- Tubazione  $a-b$ : lunghezza  $L_{ab} = 15 \text{ m}$ , velocità media del fluido  $w_{ab} = 3 \text{ m/s}$ , coefficiente di Darcy  $\lambda_{ab} = 0.03$ .
- Tubazione  $b-c$ : diametro  $D_{bc} = D_{ab}$ , coefficiente di Darcy  $\lambda_{bc} = 0.03$ .
- Tubazione  $c-d$ : diametro  $D_{cd} = 0.7 D_{ab}$ , coefficiente di Darcy  $\lambda_{cd} = 0.025$ .
- Pompa  $P_1$ , prevalenza  $h'_1 = 300 \text{ m}$ , rendimento  $\eta_{P1} = 0.8$ .
- Pompa  $P_2$ , rendimento  $\eta_{P2} = 0.75$ .

Trascurando le perdite di carico concentrate, determinare:

4. La prevalenza della pompa  $P_2$ ,  $h'_2$ ;
5. La potenza elettrica necessaria per il pompaggio del fluido  $W_{tot}$  (si consideri unitario il rendimento elettrico).
6. La pressione relativa all'interno dell'accumulatore S, la cui superficie libera si trova ad un'altezza  $Z = 3 \text{ m}$  superiore rispetto a quella del punto  $c$ .
7. La potenza elettrica ottenuta dalla caduta dell'acqua nel bacino inferiore, supponendo un rendimento di conversione (potenza ottenuta/potenza max. ottenibile)  $\eta_c = 85\%$ , ed il rendimento dell'impianto di pompaggio (potenza elettrica restituita/potenza elettrica assorbita).



**Soluzione**

Il diametro della tubazione  $a-b$  è ottenibile dal valore della portata

$$G = \rho w_{ab} A = \rho w_{ab} \frac{\pi D_{ab}^2}{4}; D_{ab} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \rho w_{ab}}} = 0.84 \text{ m}$$

Le velocità  $w_{bc}$  e  $w_{cd}$  sono ottenibili dall'equazione di continuità

$$w_{bc} = w_{ab} = 3 \text{ m/s}$$

$$w_{ab} \frac{\pi D_{ab}^2}{4} = w_{cd} \frac{\pi D_{cd}^2}{4} \quad ; \quad w_{cd} = w_{ab} \frac{D_{ab}^2}{D_{cd}^2} = \frac{w_{ab}}{0.7^2} = 6.12 \text{ m/s}$$

La lunghezza dei tratti di tubazione  $b-c$  e  $c-d$  è data da

$$L_{b,c} = \frac{H_c - H_b}{\text{sen } 60^\circ} = 231 \text{ m}$$

$$L_{c,d} = \frac{H_d - H_c}{\text{sen } 60^\circ} = 427 \text{ m}$$

**Domanda 1:** La prevalenza della pompa  $P_2$  si risolve applicando l'equazione generalizzata di Bernoulli tra le due superfici libere dei bacini, 1 e 2, tenuto conto che  $p_1 = p_2 = p_{atm}$  e che le velocità sulla superfici libere dei bacini possono essere trascurate

$$(H_2 - H_1) = h'_1 + h'_2 - h_a$$

Le perdite di carico sono unicamente di tipo distribuito e valgono

$$h_{a,ab} = \lambda_{ab} \frac{L_{ab}}{D_{ab}} \frac{w_{ab}^2}{2g} = 0.25 \text{ m}$$

$$h_{a,bc} = \lambda_{bc} \frac{L_{bc}}{D_{bc}} \frac{w_{bc}^2}{2g} = 4.72 \text{ m}$$

$$h_{a,cd} = \lambda_{cd} \frac{L_{cd}}{D_{cd}} \frac{w_{cd}^2}{2g} = 30.32 \text{ m}$$

$$h_a = h_{a,ab} + h_{a,bc} + h_{a,cd} = 35.29 \text{ m}$$

Si ottiene quindi

$$h'_2 = (H_2 - H_1) - h'_1 + h_a = 299 \text{ m}$$

**Domanda 2:** La potenza resa dalle pompe al fluido vale rispettivamente

$$W_{p1} = G g h'_1 = 4.91 \text{ MW} \quad W_{p2} = G g h'_2 = 5.15 \text{ MW}$$

mentre quella assorbita è data da

$$W_{p1,a} = \frac{G g h'_1}{\eta_{p1}} = 6.13 \text{ MW} \quad W_{p2,a} = \frac{G g h'_2}{\eta_{p2}} = 6.87 \text{ MW}$$

e pertanto  $W_a = 13 \text{ MW}$

**Domanda 3:** è necessario applicare l'equazione di Bernoulli al tratto di circuito comprese tra le superfici libere del bacino inferiore e del serbatoio S, tenendo conto che: a) in tale tratto è presente solo la pompa P<sub>1</sub>; b) le velocità sulle due superfici libere sono trascurabili; c) bisogna considerare solo le perdite di carico distribuite relative ai tratti *a-b* e *b-c*.

$$\frac{p_c - p_1}{\gamma} + [(H_c + Z) - H_1] = h'_{p1} - h_{a,ab} - h_{a,bc}$$

da cui si ottiene il valore della pressione relativa nel serbatoio:

$$p_c - p_1 = \gamma \{ -[(H_c + Z) - H_1] + h'_{p1} - h_{a,ab} - h_{a,bc} \} = 903 \text{ kPa}$$

**Domanda 4:** La potenza ottenibile dalla caduta dell'acqua è data da

$$W_c = \eta_c g G (H_2 - H_1) = 8.06 \text{ MW}$$

e pertanto il rendimento globale di conversione vale  $\eta_G = \frac{W_c}{W_a} = 0.62$ .



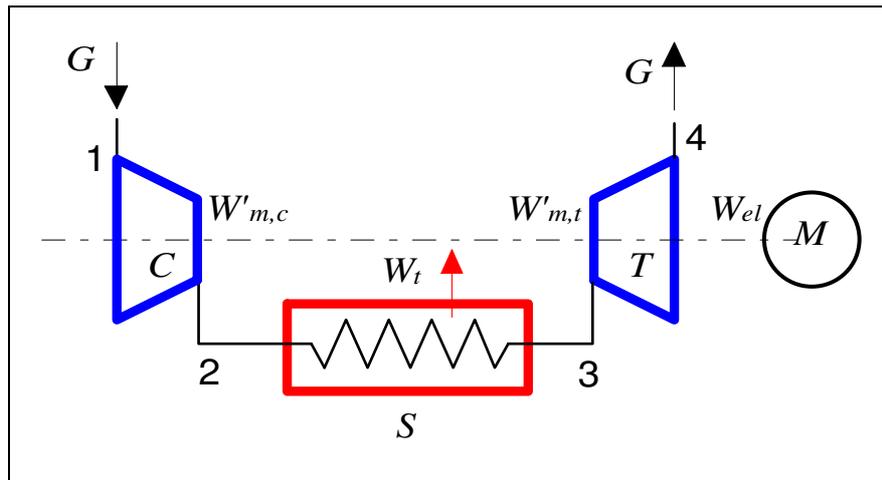
**ESERCIZIO C.35 (2002 - Per l'anno 2002 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Un impianto di condizionamento per aeromobili preleva una portata di aria  $G_a = 3 \text{ kg/s}$  a pressione atmosferica ( $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 40 \text{ °C}$ ) per introdurla all'interno della cabina dell'aereo ad una temperatura  $T_4 = 14 \text{ °C}$  e ad una pressione  $p_4 = 1.15 \text{ bar}$ . A tale scopo (vedi figura) si comprime l'aria in un compressore adiabatico, con rendimento isoentropico  $\eta_C = 0.9$ , la si refrigera in uno scambiatore di calore a superficie S, adiabatico verso l'esterno, per farla espandere infine nella turbina adiabatica T, con rendimento  $\eta_T = 0.815$ . La potenza necessaria per azionare il compressore è prelevata in parte dalla turbina e per la parte rimanente dal motore elettrico M. La trasformazione nello scambiatore può essere considerata isobara ed il sistema opera in condizioni di regime stazionario.

Si determini:

6. la pressione  $p_3$  che bisogna imporre all'ingresso turbina per avere una temperatura dell'aria  $T_3 = 123 \text{ °C}$ .
7. la temperatura dell'aria in uscita dal compressore,  $T_2$ ;
8. la potenza termica ceduta nello scambiatore,  $W_i$ ;
9. la potenza elettrica erogata dal motore,  $W_{el}$  (si consideri unitario il rendimento elettrico del motore).

Si consideri l'aria come un gas ideale con  $c_p = 1005 \text{ J/(kg K)}$  costante ed  $R = 287 \text{ J/(kg K)}$



**Soluzione**

Per una turbina che funziona con gas ideale a  $c_p$  costante si ha

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4i}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4i}}$$

La temperatura ideale di uscita dalla turbina è data quindi da

$$T_{4i} = T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\eta_T} = 262.4 \text{ K}$$

e pertanto la pressione in ingresso si può ottenere da

$$\frac{T_3}{T_{4i}} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{R/c_p} \rightarrow p_3 = p_4 \left(\frac{T_3}{T_{4i}}\right)^{c_p/R} = 4.87 \text{ bar}$$

La temperatura ideale e reale in uscita dal compressore sono date rispettivamente da

$$T_{2i} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{R/c_p} = 492.0 \text{ K} ; T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_c} = 511.9 \text{ K}$$

La potenza ceduta nello scambiatore vale pertanto

$$W_t = G(h_3 - h_2) = G c_p (T_3 - T_2) = -348.9 \text{ kW}$$

La potenza meccanica necessaria al compressore vale

$$W'_{m,c} = G(h_1 - h_2) = G c_p (T_1 - T_2) = -599.2 \text{ kW}$$

La turbina eroga una potenza meccanica pari a

$$W'_{m,t} = G(h_3 - h_4) = G c_p (T_3 - T_4) = 328.6 \text{ kW}$$

e pertanto il motore elettrico (supposto di rendimento unitario) deve erogare una potenza data da

$$W_{el} = |W'_{m,c}| - W'_{m,t} = 270.5 \text{ kW}$$

□

**ESERCIZIO C.36 (2002 - Per l'anno 2002 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Del vapore acqueo entra in un ugello alla velocità  $w_1 = 10 \text{ m/s}$ , ad una temperatura  $T_1 = 715 \text{ °C}$  ed una pressione  $p_1 = 8 \text{ MPa}$ . La sezione di ingresso dell'ugello è pari ad  $A_1 = 2200 \text{ mm}^2$ . Il sistema è in condizioni stazionarie ed a pareti rigide. All'uscita dell'ugello il fluido ha pressione  $p_2 = 4 \text{ bar}$ , temperatura  $T_2 = 196 \text{ °C}$  ed una velocità  $w_2 = 900 \text{ m/s}$ . Ricavando le proprietà del vapore dal diagramma allegato o dalle tabelle allegate alle dispense, determinare:

1. la portata di vapore nel dispositivo;

2. la sezione di uscita dell'ugello;
3. la potenza termica dissipata attraverso le pareti dell'ugello;
4. la perdita di potenza meccanica nel dispositivo (supponendo che il calore sia scambiato a temperatura ambiente  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
5. Tracciare inoltre la trasformazione subita dal fluido sul diagramma  $T$ - $s$ .

**Soluzione**

Dalle tabelle termodinamiche si ricavano i seguenti valori delle grandezze di stato nelle sezioni 1 e 2:

Punto	p	T	h	s	af	v
	bar	$^\circ\text{C}$	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg	m <sup>3</sup> /kg
1	80	715	3918.6	7.318	1736.743	0.055742
2	4	196	2852.1	7.153	1124.526	0.529262

La diminuzione di entropia all'uscita è compatibile con il fatto che il sistema non è adiabatico. La portata di vapore è data da

$$G = \rho_1 w_1 A_1 = \frac{w_1 A_1}{v_1} = 0.395 \text{ kg/s}$$

La sezione in uscita si ricava dal bilancio di massa

$$G = \frac{w_2 A_2}{v_1} \rightarrow A_2 = \frac{G v_2}{w_2} = 232 \text{ mm}^2$$

La potenza termica scambiata si ricava dal bilancio energetico (dove non si può trascurare la variazione di energia cinetica)

$$W_t = G \left[ \left( h_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) - \left( h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) \right] = -261 \text{ kW}$$

Ed infine, la perdita di potenza meccanica è ottenibile dal bilancio di disponibilità (nuovamente la variazione di energia cinetica deve essere tenuta in conto)

$$W'_{m,a} = G (a_{f,1} - a_{f,2}) = G \left\{ \left[ \left( h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) - \left( h_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) \right] - T_0 (s_1 - s_2) \right\} = -W_t - G T_0 (s_1 - s_2) = 241.6 \text{ kW}$$

Infatti, dato che dal dispositivo si ottiene potenza meccanica nulla, la massima potenza disponibile coincide con quella perduta.

NOTA: il valore della potenza termica dissipata attraverso le pareti è inverosimile, date le limitate dimensioni dell'ugello: i dati del problema sono stati infatti "adattati" a fini didattici.



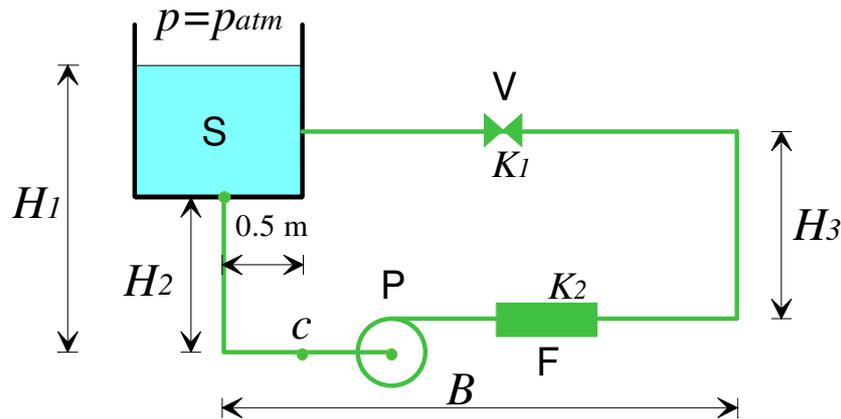
**ESERCIZIO C.37 (2003 - Per l'anno 2003 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

L'impianto di refrigerazione di un trasformatore può essere schematizzato come in Fig.1. La pompa P preleva il fluido dal serbatoio S, lo fa circolare in una tubazione che contiene un filtro F ed una valvola V per poi reimmetterlo nel serbatoio stesso. Il fluido di lavoro è olio (densità  $\rho = 870 \text{ kg/m}^3$ , viscosità  $\mu = 140 \text{ mPa s}$ ) percorre la tubazione ad una velocità  $w = 2.5 \text{ m/s}$ . La tubazione può essere considerata idraulicamente liscia. Sono noti inoltre i seguenti dati

- quote geometriche (vedi figura 1)  $H_1 = 6.8 \text{ m}$ ,  $H_2 = 5.8 \text{ m}$ ,  $H_3 = 6.3 \text{ m}$ ,  $B = 4.3 \text{ m}$ .
- diametro della tubazione  $D_t = 72 \text{ mm}$ .

Nota che i coefficienti di perdita di carico concentrata valgono  $K_1=30$  per il filtro e  $K_2=6$  per la valvola, e assumendo valori ragionevoli per i coefficienti ed altri eventuali dati mancanti, determinare:

1. la portata di fluido nel circuito;
2. la prevalenza della pompa;
3. la potenza resa dalla pompa al fluido;
4. la potenza assorbita dalla pompa, assumendo per la stessa un rendimento  $\eta_p = 0.69$ ;
5. la pressione relativa del fluido nel punto  $c$ .



### Soluzione

**Domanda 1:** La portata di fluido è ottenibile semplicemente come  $G = \rho w A = \rho w \frac{\pi D_t^2}{4} = 8.86$  kg/s

**Domanda 2:** Si può applicare l'equazione di Bernoulli al circuito chiuso avente come ingresso e come uscita la superficie libera dell'acqua nel serbatoio. Si ha pertanto

$$0 = h' - h_{ac} - h_{ad} \rightarrow h' = h_{ac} + h_{ad}$$

Per la valutazione delle perdite distribuite occorre calcolare il numero di Reynolds,

$$Re = \frac{\rho w D_t}{\mu} = 1119$$

essendo  $Re$  inferiore a 2000, il moto è laminare ed il coefficiente di Darcy-Weisbach è esprimibile come  $\lambda = \frac{64}{Re} = 0.057$

le perdite distribuite valgono quindi  $h_{ad} = \lambda \frac{(2B - 0.5 + H_3 + H_2)}{D_t} \frac{w^2}{2g} = 11.3$  m

Le perdite concentrate sono dovute alla valvola, al filtro, alle curve e all'imbocco e lo sbocco dal serbatoio; assumendo un coefficiente  $K_c = 0.5$  per le curve e un coefficiente  $K_i = K_s = 1$  per imbocco e sbocco si ha

$$h_{ac} = (3K_c + K_1 + K_2 + K_i + K_s) \frac{w^2}{2g} = 12.6$$
 m

per cui si ha infine  $h' = h_{ac} + h_{ad} = 23.9$  m

**Domande 3-4:** La potenza resa dalla pompa al fluido vale  $W_p = G g h' = 2.07$  kW

quella assorbita è data da  $W_{p,a} = \frac{G g h'}{\eta_p} = 3.01$  kW

**Domanda 5:** è necessario applicare l'equazione di Bernoulli al tratto di circuito comprese tra

la superficie libera del serbatoio (1) ed il punto  $c$ :  $\frac{p_c - p_1}{\gamma} + \frac{\alpha w^2}{2g} - H_1 = -h_{ac,1-c} - h_{ad,1-c}$

Dove, essendo il moto laminare,  $\alpha=2$ . Le perdite concentrate nel tratto 1-c valgono

$$h_{ac} = (K_c + K_s) \frac{w^2}{2g} = 0.5 \text{ m}$$

e le perdite distribuite 
$$h_{ad} = \lambda \frac{(0.5 + H_2)}{D_1} \frac{w^2}{2g} = 1.6 \text{ m}$$

Essendo  $p_1$  appunto la pressione atmosferica, si ha che la pressione relativa in c è data da

$$p_c - p_1 = \gamma \left\{ H_1 - \frac{2w^2}{2g} - h_{ac,1-c} - h_{ad,1-c} \right\} = 35 \text{ kPa}$$

□

**ESERCIZIO C.38 (2003 - Per l'anno 2003 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

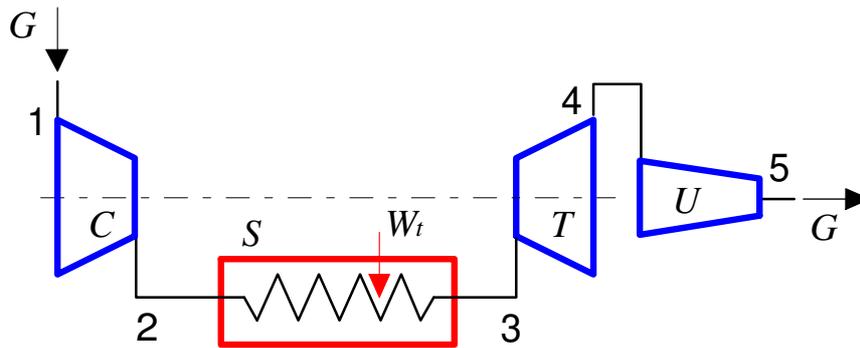
Un motore aeronautico (vedi Figura 2) è costituito da un compressore C accoppiato ad una turbina T, tra i quali è interposta una camera di combustione S isobara destinata ad incrementare la temperatura del fluido (questa parte del sistema viene anche detta "generatore di gas"). All'uscita della turbina è collegato un ugello U, deputato ad accelerare il gas per imprimere la spinta all'aeromobile.

Il fluido di lavoro può essere considerato per semplicità aria standard (gas ideale con  $c_p = 1005 \text{ J/kg K} = \text{costante}$  ed  $R = 287 \text{ J/kg K}$ ). La potenza meccanica all'albero della turbina è destinata unicamente all'azionamento del compressore. Il sistema tratta una portata di aria pari a  $G_a = 58 \text{ kg/s}$ , e la velocità in uscita all'ugello è pari a  $w_5 = 1746 \text{ km/h}$ . Sono noti inoltre i seguenti dati

- Pressione esterna  $p_1 = p_5 = 0.4 \text{ bar}$ .
- Pressione di ingresso ed uscita della camera di combustione  $p_2 = p_3 = 15 \text{ bar}$ .
- Temperatura di ingresso turbina  $T_3 = 1190 \text{ °C}$
- Temperatura di ingresso aria,  $T_1 = -40 \text{ °C}$
- Rendimento isoentropico del compressore,  $\eta_C = 0.89$

Si assuma di poter trascurare la velocità in uscita alla turbina ed in ingresso all'ugello,  $w_4 \approx 0$ . Nelle ulteriori ipotesi che il sistema sia in condizioni stazionarie, tutti i componenti tranne la camera di combustione siano adiabatici e l'espansione nell'ugello sia isoentropica, determinare:

1. la temperatura in uscita dal compressore,  $T_2$ ;
2. la potenza termica che è necessario fornire in camera di combustione,  $W_i$ ;
3. la temperatura in uscita dalla turbina,  $T_4$ ;
4. la temperatura in uscita dall'ugello,  $T_5$ ;
5. la pressione in uscita dalla turbina,  $p_4$ ;
6. il rendimento isoentropico della turbina,  $\eta_T$  (nota: questo valore può essere più basso di quanto normalmente atteso)
7. il numero di Mach in uscita all'ugello;
8. il diametro della sezione di uscita dell'ugello, supponendo che esso sia circolare.



**Soluzione**

**Domanda 1:** La temperatura ideale e reale in uscita dal compressore sono date rispettivamente da

$$T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{R/c_p} = 656.3 \text{ K} ; T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_c} = 708.7 \text{ K}$$

**Domanda 2:** La potenza termica in camera di combustione è data da  $W_t = G(h_3 - h_2) = G c_p (T_3 - T_2) = 43.98 \text{ MW}$

**Domanda 3:** La temperatura in uscita dalla turbina si ottiene uguagliando la potenza del compressore a quella della turbina

$$G c_p (T_3 - T_4) = G c_p (T_2 - T_1) \rightarrow T_4 = T_3 - (T_2 - T_1) = 987.6 \text{ K}$$

**Domanda 4:** La temperatura in uscita dall'ugello si ottiene dal bilancio energetico dello stesso

$$G h_4 = G \left( h_5 + \frac{w_5^2}{2} \right) \rightarrow G c_p (T_4 - T_5) = G \frac{w_5^2}{2} \text{ da cui } T_5 = T_4 - \frac{w_5^2}{2 c_p} = 870.6 \text{ K}$$

**Domanda 5:** per ottenere la pressione in uscita alla turbina consideriamo il fatto che l'espansione nell'ugello è isentropica

$$p_4 = p_5 \left( \frac{T_4}{T_5} \right)^{c_p/R} = 0.6 \text{ bar}$$

**Domanda 6:** la temperatura ideale di uscita dalla turbina è data da

$$T_{4i} = T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{R/c_p} = 589.6 \text{ K} \text{ e quindi il suo rendimento isentropico vale } \eta_r = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4i}} = 0.54$$

**Domanda 7:** la velocità del suono in uscita all'ugello è data da (per un gas ideale)

$$c_5 = \sqrt{k R T_5} = 591.4 \text{ m/s, per cui si ha } M = \frac{w_5}{c_5} = 0.82 \text{ (il moto è subsonico, non è quindi}$$

necessario un ugello di De Laval)

**Domanda 7:** la sezione ed il diametro di uscita dell'ugello si ricavano da

$$G = \rho_5 w_5 A_5 = \rho_5 w_5 \frac{\pi D_5^2}{4} \text{ dove } \rho_5 = \frac{1}{v_5} = \frac{p_5}{R T_5} = 0.16 \text{ kg/m}^3, \text{ da cui infine } D_5 = \sqrt{\frac{4G}{\pi \rho_5 w_5}} = 0.97 \text{ m}$$

□

**ESERCIZIO C.39 (2003 - Per l'anno 2003 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Una turbina a vapore a contropressione è alimentata da un generatore di vapore a ricircolo secondo lo schema rappresentato in Figura 3. In particolare, nel separatore S la miscela liquido-vapore in uscita dal fascio evaporatore 2-3 viene separata in vapore saturo secco (che

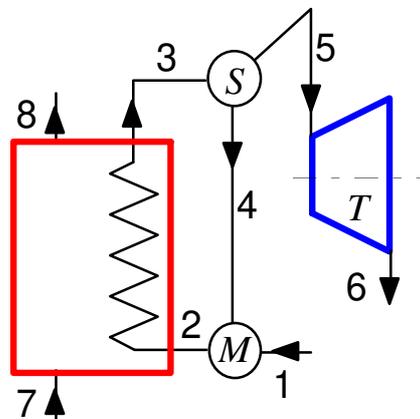
alimenta la turbina, punto 5) e liquido saturo (punto 4). Quest'ultimo viene ricircolato e mescolato all'acqua in ingresso nello scambiatore a miscelamento M, e successivamente reimpresso nel fascio evaporatore. Si ha quindi, ovviamente,  $x_5 = 1$ ,  $x_4 = 0$ .

Il generatore è alimentato da gas di combustione che può essere considerato gas ideale con  $c_p = 1100 \text{ J/(kg K)}$  costante e  $k = 1.31$ . Il sistema è in condizioni stazionarie e tutti i componenti possono essere considerati adiabatici verso l'esterno. Sono noti i seguenti dati

- Potenza meccanica erogata dalla turbina  $W'_m = 11.8 \text{ MW}$
- Pressione del vapore all'ammissione in turbina,  $p_5 = 100 \text{ bar}$
- Il generatore di vapore può essere considerato isobaro, ovvero  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5$
- Pressione in uscita alla turbina  $p_6 = 4 \text{ bar}$
- Rendimento isoentropico della turbina  $\eta_T = 0.79$ ;
- Temperatura di ingresso dell'acqua  $T_1 = 20 \text{ °C}$ ;
- Temperatura e pressione di ingresso dei gas di combustione  $T_7 = 936 \text{ °C}$ ,  $p_7 = 1.2 \text{ bar}$ ;
- Temperatura e pressione di uscita dei gas di combustione  $T_8 = 730 \text{ °C}$ ,  $p_8 = 1.2 \text{ bar}$ ;
- Titolo in uscita dal fascio evaporatore  $x_3 = 0.59$

Determinare:

1. la portata di acqua necessaria ad ingresso generatore  $G_1$ ;
2. la portata di gas di combustione necessaria,  $G_7$ ;
3. il titolo e la temperatura del vapore in uscita alla turbina,  $x_6$ ,  $T_6$ ;
4. il rendimento exergetico del generatore di vapore (considerando le sezioni di ingresso e uscita 7,8,1,5);
5. il rendimento exergetico della turbina;
6. la portata di vapore nel fascio evaporatore,  $G_3$ .



### Soluzione

Dalle tabelle termodinamiche si ricavano i seguenti valori delle grandezze di stato nelle sezioni di interesse:

Punto	$p$	$T$	$h$	$s$	$a_f$	$v$	$x$
	bar	°C	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg	m <sup>3</sup> /kg	
1	100	20	93.3	0.294	5.520927488	0.000997	
3	100	311.1	2217.8	4.746	802.6309705	0.011647562	0.62
4	100	311.1	1407.7	3.360	405.965085	0.001452567	0
5	100	311.1	2724.9	5.614	1050.950265	0.018029794	1

6i	4	143.7	2204.4	5.614	530.4620362	0.34697578	0.75
6	4	143.7	2300.7	5.845	557.8757388	0.367798686	0.79

dove i dati di input sono indicati nelle caselle in colore (la entalpia,  $h_6$  verrà determinata successivamente).

**Domanda 1:** La portata di fluido in ingresso generatore e uguale a quella di ingresso in turbina. Quest'ultima è ottenibile da

$$W'_m = G_5 (h_5 - h_6) = G_5 \eta_t (h_5 - h_{6i})$$

da cui

$$G_5 = G_1 = \frac{W'_m}{\eta_t (h_5 - h_{6i})} = 27.8 \text{ kg/s}$$

**Domanda 2:** la portata di gas nel generatore di vapore è ottenibile dal bilancio dello scambiatore di calore avente ingressi ed uscite nelle sezioni 1,5,7,8: adottando questo sistema, il valore della portata nel circuito di ricircolo è ininfluente.

$$G_5 (h_5 - h_1) = G_7 (h_7 - h_8)$$

considerando i fumi un gas ideale a  $c_p$  costante si ha

$$G_7 (h_7 - h_8) = G_7 c_p (T_7 - T_8)$$

da cui

$$G_7 = \frac{G_5 (h_5 - h_1)}{c_p (T_7 - T_8)} = 323 \text{ kg/s}$$

**Domanda 3:** il titolo e la temperatura in uscita sono desumibili direttamente dai diagrammi o le tavole del vapore una volta note  $p_6$  e  $h_6$  (vedi tabella sopra) dove

$$h_6 = h_5 - \eta_t (h_5 - h_{6i}) = 2300.7 \text{ kJ/kg}$$

**Domanda 4-5:** i rendimenti exergetici del generatore di vapore e della turbina sono ricavabili direttamente dalle relative definizioni

$$\epsilon_t = \frac{W'_m}{W'_{m,a}} = \frac{W'_m}{G_5 (a_{f5} - a_{f6})} = 0.86$$

$$\epsilon_t = \frac{G_5 (a_{f5} - a_{f1})}{G_7 (a_{f7} - a_{f8})} = \frac{G_5 (a_{f5} - a_{f1})}{G_7 c_p \left( T_7 - T_8 - 298.15 \ln \frac{T_7}{T_8} \right)} = 0.53$$

**Domanda 6:** dal bilancio di massa ed energia del separatore (sistema adiabatico e rigido con un ingresso, 3, e due uscite, 4 e 5) si ha

$$\begin{cases} G_3 = G_4 + G_5 \\ G_3 h_3 = G_4 h_4 + G_5 h_5 \end{cases} \text{ nelle incognite } G_3 \text{ e } G_4. \text{ Eliminando } G_4 \text{ si ha } G_3 = G_5 \frac{h_5 - h_4}{h_3 - h_4} = 45.2 \text{ kg/s}$$

Lo studente interessato può dimostrare che  $G_5 = G_3 x_3$ .

□

**ESERCIZIO C.40 (2004 - Per l'anno 2004 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Si deve realizzare il sistema di ventilazione per un locale fumatori, secondo lo schema di Figura 1. Il ventilatore V deve essere in grado di asportare una portata volumetrica  $G_v = 3080 \text{ m}^3/\text{h}$  attraverso il condotto di mandata AB ed il filtro F1, scaricando all'esterno. L'aria viene introdotta nella locale attraverso il condotto di aspirazione CD ed il filtro F2. Il locale è mantenuto in depressione di 50 Pa rispetto all'atmosfera esterna. Sono noti i seguenti dati:

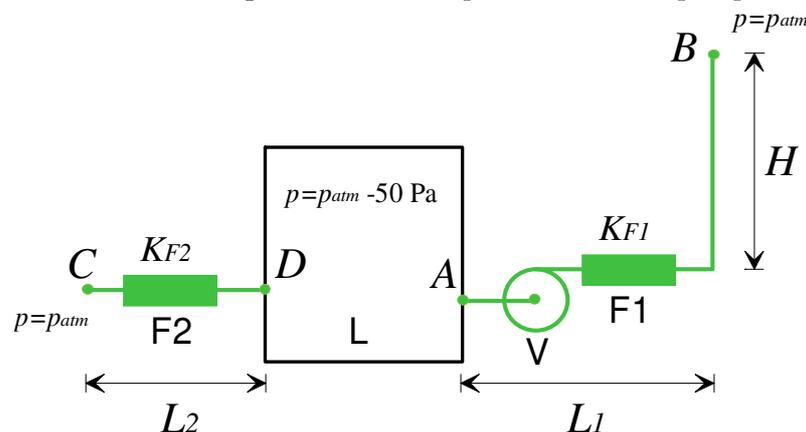
- quote geometriche (vedi figura 1)  $L_1 = 2.2 \text{ m}$ ,  $L_2 = 4.2 \text{ m}$ ,  $H = 10.2 \text{ m}$ .

- proprietà fisiche dell'aria a 20°C: densità  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ , viscosità dinamica  $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ ;
- coefficiente di perdita concentrata per il filtro F1  $K_{F1} = 5$  (si considera che i filtri vengano attraversati dal fluido alla stessa velocità che esso ha nella condotta principale);
- coefficiente di perdita di carico distribuita nei condotti  $\lambda = 0.02$ .

Assumendo valori ragionevoli per i coefficienti ed altri eventuali dati mancanti, determinare:

1. Il diametro della tubazione di mandata AB, assumendo che sia di sezione circolare e che il fluido vi scorra con velocità  $w = (10.4) \text{ m/s}$ .
2. la prevalenza del ventilatore;
3. la potenza resa dal ventilatore al fluido;
4. la potenza assorbita dal ventilatore, assumendo per lo stesso un rendimento  $\eta_p = 0.6$ ;
5. Il coefficiente di perdita di carico da assegnare al filtro F2,  $K_{F2}$ , per mantenere nel locale la depressione desiderata, ipotizzando che il diametro del condotto di aspirazione sia pari a 1.5 volte quello della tubazione di mandata ( $D_{CD} = 1.5 D_{AB}$ ).

*Suggerimenti: in queste condizioni, l'aria può essere trattata come un fluido incomprimibile, al pari dell'acqua. Il ventilatore equivale in tutto e per tutto ad una pompa.*



### Soluzione

**Domanda 1:** Il diametro della tubazione di mandata si ottiene dall'espressione della portata volumetrica

$$G_v = w A = w \frac{\pi D_t^2}{4} \Rightarrow D_t = \sqrt{\frac{4 G_v}{\pi w}} = 0.324 \text{ m}$$

**Domanda 2:** Si può applicare l'equazione di Bernoulli al circuito aperto AB, dal locale all'uscita. Se si considerano i punti A e B appartenenti rispettivamente al locale ed all'atmosfera esterna immediatamente dopo lo sbocco dal camino, le velocità del fluido sono nulle in entrambi i casi.

$$\frac{P_B - P_A}{\rho g} + (z_B - z_A) = h' - h_{ac} - h_{ad} \rightarrow h' = h_{ac} + h_{ad} + \frac{P_B - P_A}{\rho g} + (z_B - z_A)$$

Le perdite distribuite valgono  $h_{ad} = \lambda \frac{(L_1 + H)}{D_t} \frac{w^2}{2g} = 4.2 \text{ m}$

Le perdite concentrate sono dovute al filtro, alla curva a 90° e all'imbocco e lo sbocco del condotto; assumendo un coefficiente  $K_c = 0.5$  per la curva e un coefficiente  $K_i = K_s = 1$  per imbocco e sbocco si ha

$$h_{ac} = (K_c + K_i + K_s + K_{F1}) \frac{w^2}{2g} = 41.4 \text{ m}$$

per cui si ha infine  $h' = 4.2 + 41.4 + \frac{50}{9.81 \cdot 1.2} + 10.2 = 60 \text{ m}$

**Domande 3-4:** La potenza resa dal ventilatore al fluido vale  $w_p = G g h' = 604 \text{ W}$

quella assorbita è data da  $w_{p,a} = \frac{G g h'}{\eta_p} = 1007 \text{ W}$

**Domanda 5:** è necessario applicare di nuovo l'equazione di Bernoulli al tratto di circuito CD

$$\frac{P_D - P_C}{\rho g} = -h_{ac} - h_{ad}$$

La velocità nel tratto CD vale  $w' = w \left( \frac{D_i}{D'_i} \right)^2 = w \left( \frac{1}{1.5} \right)^2 = 4.62 \text{ m/s}$

Le perdite concentrate nel tratto 1-c valgono  $h_{ac} = (2 + K_{F2}) \frac{w'^2}{2g}$  e le perdite distribuite

$$h_{ad} = \lambda \frac{H_2}{D'_i} \frac{w'^2}{2g}$$

Sostituendo le espressioni precedenti nell'equazione di Bernoulli e ricavando  $K_{F2}$  si ha

$$K_{F2} = \frac{(P_C - P_D)}{\rho} \frac{2}{w'^2} - \left( \lambda \frac{H_2}{D'_i} + 2 \right) = 1.73$$

□

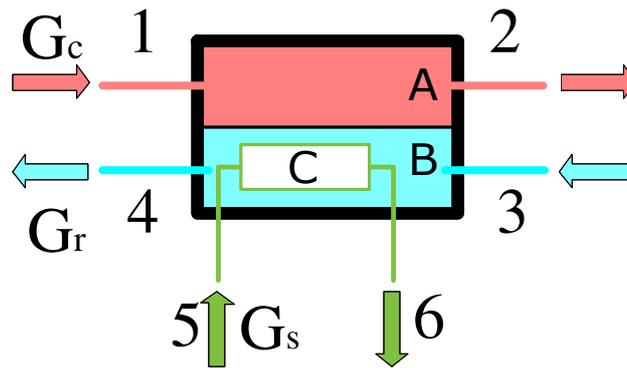
**ESERCIZIO C.41 (2004 - Per l'anno 2004 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Lo scambiatore a tre corpi per una caldaia domestica per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria è schematizzabile come in Fig.2. I gas combusti provenienti dal bruciatore (corpo A) cedono calore all'acqua del riscaldamento che scorre nel corpo B. L'acqua calda sanitaria scorre nel corpo C, interno al corpo B. Sono noti i seguenti dati:

- Gas combusti (corpo A): temperatura di ingresso  $T_1 = 600^\circ\text{C}$ , temperatura di uscita  $T_2 = 114^\circ\text{C}$ ;
- Acqua riscaldamento (corpo B): temperatura di ingresso  $T_3 = 51^\circ\text{C}$ , temperatura di uscita  $T_4 = 80^\circ\text{C}$ , portata  $G_R = 3.4 \text{ kg/min}$
- Acqua sanitaria (corpo C): temperatura di ingresso  $T_5 = 10^\circ\text{C}$ , temperatura di uscita  $T_6 = 64^\circ\text{C}$ , portata  $G_S = 0.5 \text{ kg/min}$ .
- Calore specifico dei gas di combustione  $c_{pg} = 1100 \text{ J/kg K} = \text{costante}$ ; calore specifico dell'acqua  $c_{pa} = 4186 \text{ J/kg K} = \text{costante}$ ;

Nelle ulteriori ipotesi che il sistema sia in condizioni stazionarie, isobaro ed adiabatico verso l'esterno, determinare:

1. La portata di gas combusti necessaria,  $G_c$ ;
2. la potenza termica scambiata tra i gas combusti e l'acqua di riscaldamento,  $W_{11}$ ;
3. la potenza termica scambiata tra l'acqua di riscaldamento e l'acqua sanitaria,  $W_{12}$ ;
4. la nuova temperatura di uscita dell'acqua di riscaldamento,  $T'_4$ , quando si interrompe l'erogazione di acqua sanitaria ( $G_S = 0$ ), a parità di ogni altra condizione e una volta che il relativo transitorio si è estinto.



**Soluzione**

**Domanda 1:** Il bilancio di energia dell'intero scambiatore è dato da

$$G_C c_{pc} (T_1 - T_2) = G_R c_{pa} (T_4 - T_3) + G_S c_{pa} (T_6 - T_5)$$

da cui (dopo aver convertito le portate in kg/s) si ricava  $G_C = \frac{G_R c_{pa} (T_4 - T_3) + G_S c_{pa} (T_6 - T_5)}{c_{pc} (T_1 - T_2)} =$

0.016 kg/s

**Domanda 2:** La potenza termica scambiata tra i gas combusti e l'acqua di riscaldamento è pari a quella perduta dai gas combusti ovvero  $W_{t1} = G_C c_{pc} (T_1 - T_2) = 8.76 \text{ kW}$ .

Tale potenza non è pari a quella acquistata dall'acqua di riscaldamento,  $G_R c_{pa} (T_4 - T_3)$ , perché una parte viene ceduta all'acqua sanitaria.

**Domanda 3:** La potenza termica scambiata tra l'acqua di riscaldamento e l'acqua sanitaria è pari a quella acquistata dall'acqua sanitaria, ovvero  $W_{t2} = G_S c_{pa} (T_6 - T_5) = 1.88 \text{ kW}$ .

**Domanda 4:** Si riscrive il bilancio per uno scambiatore classico a superficie (o alternativamente si annulla  $G_S$  nel bilancio della domanda 1) per ottenere

$$T'_4 = T_3 + \frac{G_C c_{pc} (T_1 - T_2)}{G_R c_{pa}} = 87.9 \text{ °C}$$

□

**ESERCIZIO C.42 (2004 - Per l'anno 2004 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Il sistema di recupero del calore dal compressore di una centrale termoelettrica è schematizzabile come in Figura 3. L'aria calda, in uscita dal compressore C, cede calore all'acqua nello scambiatore di recupero a superficie SR. Il vapore saturo secco in uscita da detto scambiatore (punto 5) viene miscelato nello scambiatore a miscelamento SM con il vapore surriscaldato proveniente dallo scarico della turbina ad alta pressione (non rappresentata, punto 6) ed inviato all'ingresso della turbina a vapore a bassa pressione.

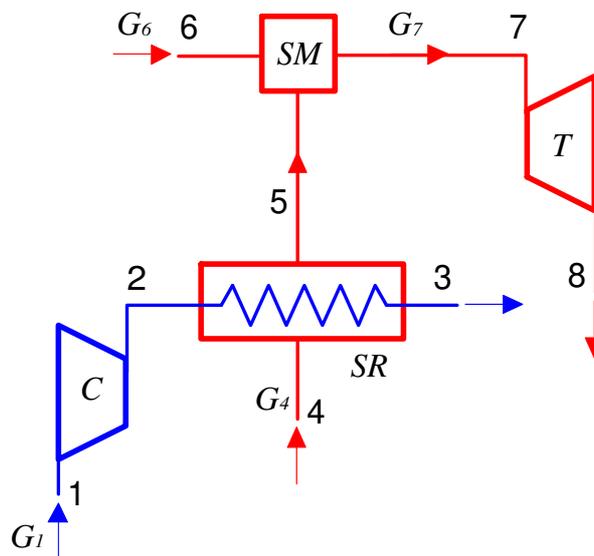
Il sistema è in condizioni stazionarie e tutti i componenti possono essere considerati adiabatici verso l'esterno. Il fluido di lavoro del compressore può essere considerato per semplicità aria standard (gas ideale con  $c_p = 1005 \text{ J/kg K}$  = costante ed  $R = 287 \text{ J/kg K}$ ). Sono noti i seguenti dati

- Rendimento isoentropico del compressore C,  $\eta_c = 0.702$ ;
- Rapporto di compressione del compressore C,  $r_p = 14.4$ ;
- Temperatura e pressione di ingresso aria nel compressore C,  $T_1 = 20 \text{ °C}$ ,  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ;
- Temperatura di uscita aria dallo scambiatore SR,  $T_3 = 250 \text{ °C}$ ;
- Pressione del fluido negli scambiatori SR e SM e all'ammissione in turbina T,  $p_4 = p_5 = p_6 = p_7 = 30 \text{ bar}$

- Pressione in uscita alla turbina  $T$   $p_8 = 0.05$  bar
- Rendimento isoentropico della turbina  $T$ ,  $\eta_T = 0.751$ ;
- Temperatura di ingresso dell'acqua nello scambiatore SR,  $T_4 = 30$  °C;
- Temperatura di ingresso del vapore surriscaldato nello scambiatore a miscelamento  $T_6 = 500$  °C;
- Portata di aria nel compressore  $G_1 = 52$  kg/s
- Portata di vapore surriscaldato in ingresso allo scambiatore SM  $G_6 = 30$  kg/s:
- 

Determinare:

1. la potenza assorbita dal compressore;
2. la portata di vapore saturo secco in uscita dallo scambiatore SR,  $G_5$ ;
3. la portata di vapore in uscita dallo scambiatore SM,  $G_7$ ;
4. la temperatura del vapore in ingresso turbina,  $T_7$ ;
5. il titolo e la temperatura del vapore in uscita alla turbina,  $x_8$ ,  $T_8$ ;
6. la potenza erogata dalla turbina.



### Soluzione

**Domanda 1:** La temperatura ideale e reale in uscita dal compressore sono date rispettivamente da

$$T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 627.9 \text{ K} ; T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_c} = 758.1 \text{ K}$$

la potenza assorbita dal compressore vale quindi

$$W'_{mC} = G_1 (h_1 - h_2) = G_1 c_p (T_1 - T_2) = -24.3 \text{ MW}$$

**Domanda 2:** Dalle tabelle termodinamiche o dal diagramma si ricavano i seguenti valori delle grandezze di stato nelle sezioni di interesse:

punto	pressione	temperatura	entalpia	entropia	titolo
	bar	°C	kJ/kg	kJ/kg K	
4	30	30	128.5	0.436	
5	30	233.9	2804.3	6.187	1
6	30	500	3456.5	7.234	
7	30	461.5	<b>3370.0</b>	7.119	
8i	0.05	32.9	2170.9	<b>7.119</b>	0.84
8r	0.05	32.9	<b>2458.7</b>	8.059	0.96

dove i dati di input sono indicati nelle caselle in colore (alcuni di essi, in colore più scuro, verranno determinati successivamente).

Il bilancio dello scambiatore a superficie SR si può scrivere come

$$G_4(h_5 - h_4) = G_1 c_p (T_2 - T_3) \text{ da cui sfruttando i dati della tabella si trova } G_4 = 4.59 \text{ kg/s.}$$

**Domanda 3:** Il bilancio dello scambiatore a miscelamento SM è dato da

$$G_5 + G_6 = G_7$$

$$G_5 h_5 + G_6 h_6 = G_7 h_7$$

da cui si ricavano  $G_7 = 34.6 \text{ kg/s}$  e  $h_7 = 3370 \text{ kJ/kg}$

**Domanda 4:** la temperatura del punto 7 ( $T_7 = 461.5 \text{ °C}$ ) si ricava direttamente dalle tabelle o dal diagramma di stato, noti  $p$  ed  $h$ .

**Domanda 5** titolo e temperatura a valle della turbina si ricavano classicamente con il seguente procedimento: si ricava l'entalpia di uscita in condizioni ideali per la trasformazione isoentropica, a partire da pressione ed entropia,  $h_{8i} = 2170 \text{ kJ/kg}$ , dopodichè si ricava  $h_8$  sfruttando la definizione di rendimento isoentropico della turbina

$$h_8 = h_7 - \eta_t (h_7 - h_{8i}) = 2458.7 \text{ kJ/kg.}$$

Si ricavano quindi temperatura e titolo con il diagramma di stato o le tavole termodinamiche, vedi tabella.

**Domanda 6** La potenza erogata dalla turbina è ottenibile da

$$W'_{mT} = G_7 (h_7 - h_8) = 31.5 \text{ MW}$$



**ESERCIZIO C.43 (2005 - Per l'anno 2005 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Lo schema di figura 1 rappresenta in maniera semplificata e fuori scala l'impianto di alimentazione di un'abitazione tramite l'acquedotto cittadino. Si suppone per semplicità che non vi siano al momento altri utenti collegati alla condotta principale e che il sistema sia in condizioni stazionarie. Il fluido è acqua alla temperatura di  $21 \text{ °C}$  (densità  $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ , viscosità dinamica  $\mu = 0.978 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$ ). Il sistema è a regime, e la pressione in A ed E è pari a quella atmosferica. Sono noti inoltre i seguenti dati:

- quote geometriche (vedi figura 1)  $H_1 = 30 \text{ m}$ ,  $H_2 = 12 \text{ m}$ ,  $L = 500 \text{ m}$ ; il tratto DE ha lunghezza trascurabile.
- portata nel circuito,  $G = 1.73 \text{ kg/s}$ ;
- diametri delle condotte AB,  $D_{AB} = 200 \text{ mm}$ , e CD,  $D_{CD} = 25 \text{ mm}$ ;
- coefficiente di perdita concentrata per la diramazione a T, localizzata in BC,  $K_B = 0.7$  (facendo riferimento alla velocità del fluido a valle);
- coefficiente di perdita di carico distribuita nei condotti per moto turbolento  $\lambda = 0.030$ , per moto laminare ( $Re < 2000$ )  $\lambda = 64/Re$ .

Assumendo valori ragionevoli per i coefficienti di perdita di carico concentrata ed altri eventuali dati mancanti, determinare:

1. la pressione relativa nel punto D;
2. il coefficiente di perdita di carico della valvola DE;
3. il nuovo valore della portata se all'interno del ramo di derivazione CD si inserisce una pompa di prevalenza  $h' = 15$  m, supponendo invariati tutti i coefficienti di perdita di carico concentrata e distribuita;
4. la potenza assorbita da tale pompa, assumendo per la stessa un rendimento  $\eta_p = 0.7$ ;
5. specificare se conviene localizzare tale pompa in prossimità del punto C o del punto D, giustificando qualitativamente la scelta;
6. (*facoltativo*) spiegare qualitativamente cosa accade alla pressione in D se altri utenti prelevano acqua dalla condotta principale tramite il punto B.

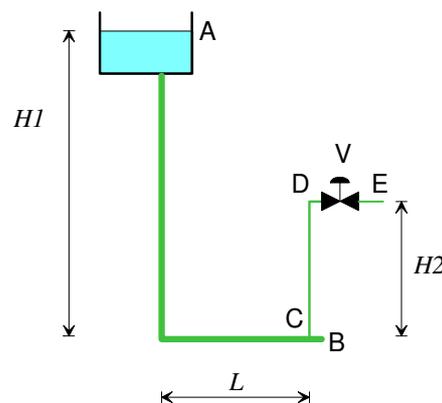


Figura 1

### Soluzione

**Domanda 1:** La velocità media di portata nei due rami si ottiene come segue

$$G = \rho w A = \rho w \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow w_{AB} = \sqrt{\frac{4G}{\rho \pi D_{AB}^2}} = 0.055 \text{ m/s} \quad w_{CD} = \sqrt{\frac{4G}{\rho \pi D_{CD}^2}} = 3.54 \text{ m/s}$$

il numero di Reynolds nei due rami vale rispettivamente

$$Re_{AB} = \frac{\rho w_{AB} D_{AB}}{\mu} = 11267, \quad Re_{CD} = \frac{\rho w_{CD} D_{CD}}{\mu} = 90135$$

quindi il moto è turbolento in entrambi i tratti.

Si può applicare l'equazione di Bernoulli al circuito aperto AD, dal serbatoio al punto a monte della valvola.

$$\frac{p_D - p_A}{\rho g} + \frac{w_{CD}^2}{2g} + (z_D - z_A) = -h_{ac} - h_{ad}$$

Essendo la pressione in A pari a quella atmosferica, la pressione relativa in D vale

$$p_D - p_A = -\rho \frac{w_{CD}^2}{2} + \rho g [(z_A - z_D) - h_{ac} - h_{ad}]$$

le perdite di carico distribuite sono date da

$$h_{ad} = \frac{\lambda}{2g} \left( \frac{H_1 + L}{D_{AB}} w_{AB}^2 + \frac{H_2}{D_{CD}} w_{CD}^2 \right) = 9.2 \text{ m} \quad (\text{dovute in grandissima parte al ramo CD del circuito})$$

e quelle concentrate (assumendo per le curve  $K=0.5$  e per il restringimento dal serbatoio al condotto AB  $K=1$ )

$$h_{ac} = (1+0.5) \frac{w_{AB}^2}{2g} + (0.7+0.5) \frac{w_{CD}^2}{2g} = 0.77 \text{ m}$$

Da cui si ha infine

$$p_D - p_A = 0.85 \text{ bar}$$

**Domanda 2:** Il rubinetto DC deve poi realizzare una perdita di carico pari a quella necessaria a riportare il fluido a pressione atmosferica, quindi applicando Bernoulli al tratto DE

$$\frac{p_E - p_D}{\rho g} = -h_{ac} = -K_R \frac{w_{CD}^2}{2g} \quad \text{da cui} \quad K_R = 2 \frac{p_D - p_E}{\rho w_{CD}^2} = 13.6$$

**Domanda 3:** In questo caso la velocità nelle tubazioni cambia, e l'equazione di Bernoulli applicata all'intero circuito fornisce

$$\frac{w_{CD}^2}{2g} + (z_E - z_A) = h' - h_{ac} - h_{ad} = h' - \left[ (1+0.5) \frac{w_{AB}^2}{2g} + (0.7+0.5+K_R) \frac{w_{CD}^2}{2g} + \frac{\lambda}{2g} \left( \frac{H_1+L}{D_{AB}} w_{AB}^2 + \frac{H_2}{D_{CD}} w_{CD}^2 \right) \right]$$

e inoltre il bilancio di massa dà

$$G = \rho w'_{AB} \frac{\pi D_{AB}^2}{4} = \rho w'_{CD} \frac{\pi D_{CD}^2}{4} \quad \rightarrow \quad w'_{AB} = \frac{D_{CD}^2}{D_{AB}^2} w'_{CD}$$

si può sostituire  $w_{AB}$  nella precedente e ricavare la velocità nel ramo CD, e da essa la portata richiesta

$$\frac{w_{CD}^2}{2g} \left[ (1.5) \frac{D_{CD}^2}{D_{AB}^2} + (1+1.2+K_R) + \lambda \left( \frac{D_{CD}^2}{D_{AB}^2} \cdot \frac{H_1+L}{D_{AB}} + \frac{H_2}{D_{CD}} \right) \right] = (z_A - z_E) + h' \quad \text{da cui} \quad w'_{CD} = 4.54 \text{ m/s}$$

$$G' = \rho w'_{CD} \frac{\pi D_{CD}^2}{4} = 2.22 \text{ kg/s}$$

**Domanda 4:** La potenza assorbita dalla pompa è data da

$$W_{p,a} = \frac{G g h'}{\eta_p} = 466 \text{ W}$$

**Domanda 5:** La pompa va localizzata in prossimità di C per evitare che le perdite di carico nel ramo CD contribuiscano ad abbassare la pressione all'aspirazione e quindi la mettano a rischio di cavitazione; meglio ancora sarebbe posizionare la pompa nel ramo AB del circuito.

**Domanda 6:** se un altro utente preleva acqua dal punto B, le perdite di carico nel tratto AB aumentano e conseguentemente la portata nel ramo CD si riduce. Dato il grande diametro di AB, tale riduzione è trascurabile finchè gli utenti sono pochi.

□

**ESERCIZIO C.44 (2005 - Per l'anno 2005 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Il sistema di compressori interrefrigerato rappresentato in Figura 2 è destinato a comprimere il metano fino alla pressione finale  $p_4 = 49 \text{ bar}$ , a partire dalle condizioni iniziali  $p_1 = 2 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 25 \text{ °C}$ . Sono inoltre noti i seguenti dati:

- portata volumetrica di metano in ingresso,  $G_{v1} = 630 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- pressione intermedia  $p_2 = p_3 = 10 \text{ bar}$ ;
- temperatura di uscita dal refrigeratore intermedio  $T_3 = 80 \text{ °C}$ .

- rendimento isoentropico del compressore A,  $\eta_{cA} = 0.92$  e del compressore B,  $\eta_{cB} = 0.85$ ;

Nelle ulteriori ipotesi che il sistema sia in condizioni stazionarie, i compressori possano essere considerati adiabatici ed il metano un gas ideale ( $c_p = \text{costante} = 2253.7 \text{ J/kg K}$  ed  $R = 518.46 \text{ J/kg K}$ ) determinare:

1. la temperature di uscita del metano dai due stadi,  $T_2$  e  $T_4$  ;
2. la potenza totale necessaria per la compressione,  $W'_{mA} + W'_{mB}$
3. la portata volumetrica di metano in uscita,  $G_{v4}$  ;
4. il diametro della tubazione di mandata,  $D_4$ , assunta in essa una velocità del metano  $w_4 = 10 \text{ m/s}$ ;
5. la potenza termica scambiata nel refrigeratore intermedio,  $W_t$  ;
6. determinare la minima potenza meccanica teoricamente richiesta per effettuare la compressione del metano fino alle stesse condizioni di temperatura e pressione del punto 4, e conseguentemente il rendimento exergetico del sistema,  $\varepsilon$  (a tal fine si consideri la potenza termica  $W_t$  scambiata con una sorgente a temperatura dello stato morto,  $T_0 = 25 \text{ °C}$ );
7. (facoltativo) discutere l'ipotesi di aver considerato il metano un gas ideale nelle condizioni del punto 4, sulla base del diagramma del fattore di comprimibilità allegato (temperatura critica del metano  $T_c = 190.9 \text{ K}$ , pressione critica  $p_c = 4.64 \text{ MPa}$ ).

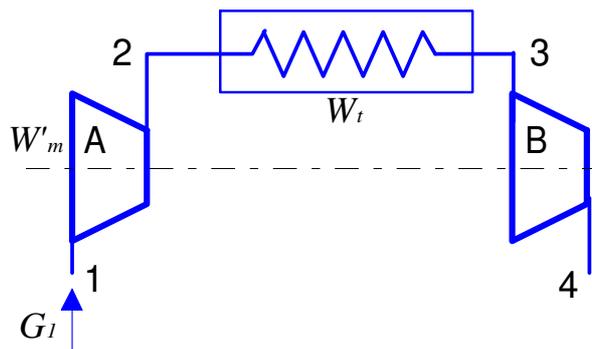


Figura 2

### Soluzione

**Domanda 1:** La temperature di uscita del metano sono date da

$$T_{2i} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{R/c_p} = 431.75 \text{ K} = 158.6 \text{ °C} \quad ; \quad T_{4i} = T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{R/c_p} = 509 \text{ K} = 235.9 \text{ °C}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_{cA}} = 443.4 \text{ K} = 170.22 \text{ °C} \quad ; \quad T_4 = T_3 + \frac{T_{4i} - T_3}{\eta_{cB}} = 536.5 \text{ K} = 263.4 \text{ °C}$$

**Domanda 2:** La potenza meccanica totale assorbita dai due compressori vale

$$W'_{mA} + W'_{mB} = G c_p [(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)] = -167.6 \text{ kW} \text{ (il segno negativo indica che è assorbita).}$$

dove la portata in massa di metano,  $G$ , è calcolata come segue

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = 0.773 \text{ m}^3/\text{kg} \quad ; \quad G = \frac{G_{v1}}{v_1} = 0.226 \text{ kg/s} \quad , \quad \text{dove} \quad G_{v1} = \frac{630}{3600} = 0.175 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Domanda 3:** La portata volumetrica in uscita vale

$$G_{v4} = G \cdot v_4 = 0.0129 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{dove} \quad v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = 0.057 \text{ m}^3/\text{kg}$$

**Domanda 4:** Il diametro della tubazione di mandata si calcola come

$$D_4 = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4G_{v4}}{w_4 \pi}} = 0.040 \text{ m}$$

**Domanda 5:** La potenza termica scambiata dal refrigeratore intermedio è data da

$$W_i = G c_p (T_3 - T_2) = -46.04 \text{ kW (il segno negativo indica che viene ceduta all'esterno).}$$

**Domanda 6:** La potenza meccanica minima necessaria, essendo il calore scambiato con una sorgente alla temperatura dello stato morto, è data dalla portata per la differenza di exergia tra ingresso ed uscita, ovvero

$$W'_{m,\min} = G(a_{f1} - a_{f4}) = G[(h_1 - h_4) - T_0(s_1 - s_4)] = G \left[ c_p (T_1 - T_4) - T_0 \left( c_p \ln \frac{T_1}{T_4} - R \ln \frac{p_1}{p_4} \right) \right] = -144.2 \text{ kW}$$

per cui il rendimento exergetico è  $\varepsilon = \frac{W'_{m,\min}}{W'_{m,\text{tot}}} = \frac{-144.2}{-167.6} = 0.86$

*NOTA: a ben vedere, non è del tutto corretto considerare la potenza termica ceduta nel recuperatore alla temperatura dello stato morto: questo implicherebbe infatti una irreversibilità nel sistema. Si può però pensare che la potenza termica ceduta nel recuperatore venga, per così dire, "riciclata" in una macchina di Carnot e riutilizzata come parte della potenza meccanica da fornire ai compressori. In questo modo, essa non compare nel bilancio di disponibilità.*

**Domanda 7:** alle condizioni del punto 4 la temperatura e la pressione ridotta valgono rispettivamente

$$T_r = \frac{T}{T_c} = 2.8 \quad p_r = \frac{p}{p_c} = 1.06$$

In queste condizioni, dal diagramma si ricava  $Z > 0.95$ , per cui l'ipotesi di gas ideale risulta perfettamente accettabile.

Piuttosto l'aver assunto il calore specifico costante è solo approssimativamente compatibile con un salto di temperatura superiore a 200 °C.

□

**ESERCIZIO C.45 (2005 - Per l'anno 2005 si dovevano risolvere almeno due esercizi tra i tre proposti)**

Una centrale geotermica lavora secondo lo schema rappresentato in Figura 3. Il vapore endogeno viene fatto espandere nella turbina T e successivamente entra nel condensatore isobaro C, dove viene condensato e successivamente ripompato nel pozzo geotermico tramite lo scarico 3. Per mantenere tale condensatore in condizioni stazionarie, una parte del condensato viene prelevata tramite l'uscita 4 ed inviata allo scambiatore a superficie S, ove viene raffreddata tramite un flusso di aria esterna, e successivamente reimpressa, previa una laminazione 6-7, nel condensatore tramite l'ingresso 7. L'intero sistema è in condizioni di regime stazionario e la trasformazione nella pompa 4-5 può essere considerata reversibile.

Sono noti i seguenti dati

- Temperatura e pressione di ingresso del vapore,  $T_1 = 460 \text{ °C}$ ,  $p_1 = 60 \text{ bar}$ ;
- Portata di vapore in ingresso,  $G_1 = 50 \text{ kg/s}$ ;
- Rendimento isoentropico della turbina T,  $\eta_t = 0.785$ ;

- Temperatura al condensatore,  $T_2 = T_3 = T_4 = 35\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Titolo in uscita dal condensatore,  $x_3 = x_4 = 0$ ;
- Temperatura di uscita acqua dallo scambiatore S,  $T_6 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- pressione nei punti 5 e 6,  $p_5 = p_6 = 2\text{ bar}$ ;
- Temperatura di ingresso ed uscita aria dallo scambiatore S,  $T_8 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_9 = 22\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Determinare:

1. la potenza erogata dalla turbina  $W'_m$ ;
2. il titolo un uscita alla turbina,  $x_2$ ;
3. la portata di acqua di ricircolo necessaria,  $G_4$ ;
4. la portata di aria necessaria per lo scambiatore S,  $G_8$ ; l'aria può essere considerata per semplicità gas ideale con  $c_p = \text{costante} = 1005\text{ J/kg K}$  ed  $R = 287\text{ J/kg K}$ ;
5. la massima potenza meccanica ottenibile dal vapore endogeno in condizioni ideali, e conseguentemente il rendimento exergetico dell'impianto; a tal fine si considerino la temperatura e la pressione dello stato morto  $T_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1\text{ bar}$  (*suggerimento: si consideri la massima potenza ottenibile dal vapore riportandolo allo stato morto in un sistema aperto a regime*).
6. (*facoltativo*) Si giustifichi qualitativamente la scelta di aggiungere il condensatore C all'impianto, anziché scaricare il vapore direttamente nell'atmosfera.

NB: Le portate  $G_4$  e  $G_8$  risulteranno molto più grandi di  $G_1$ .

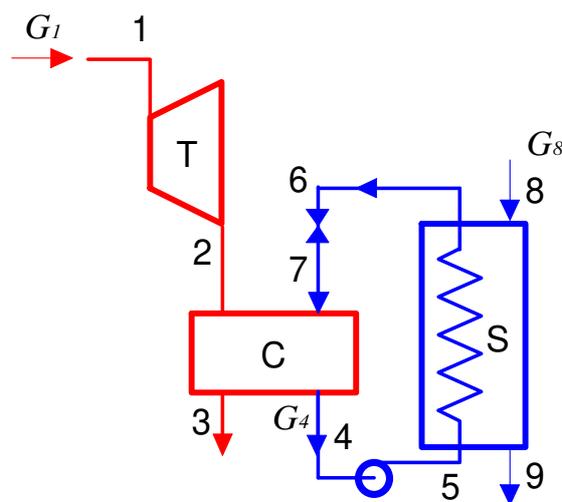


Figura 3

### Soluzione

**Domanda 1:** Dalle tabelle termodinamiche o dal diagramma si ricavano i seguenti valori delle grandezze di stato nelle sezioni di interesse:

pto	pressione	temp.	entalpia	entropia	exergia	titolo
	bar	$^\circ\text{C}$	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg	
1	60	460	3326.1	6.753	1381.9	
2i	0.056	35	2071.8	6.753	127.6	
2	0.056	35	2341.5	7.628	145.1	0.91
3	0.056	35	146.7	0.505	2.7	0
4	0.056	35	146.7	0.505	2.7	0
5	2	35	146.9	0.505	2.9	

6	2	25	105.0	0.367	0.8	
7	0.056	25	105.0	0.368	0.6	
st. morto 0	1	15	63.1	0.224	0.0	

dove i dati usati come input sono indicati nelle caselle in colore .

In particolare, l'entalpia  $h_2$  si ricava a partire da quella ideale,  $h_{2i}$ , mediante la definizione di rendimento isoentropico

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2i}} \rightarrow h_2 = h_1 - \eta_t (h_1 - h_{2i}) = 2341.5 \text{ kJ/kg}$$

La potenza erogata dalla turbina vale quindi

$$W'_m = G_1 (h_1 - h_2) = 49.2 \text{ MW}$$

**Domanda 2:** Il titolo in uscita alla turbina  $x_2$  si ricava direttamente dalle tabelle termodinamiche o dal diagramma e vale

$$x_2 = 0.91$$

**Domanda 3:** La portata  $G_4$  si ricava dal bilancio di massa ed energia del condensatore, che in questo caso è considerato uno scambiatore a miscelamento a regime con due ingressi e due uscite

$$G_2 + G_7 = G_4 + G_3$$

$$G_2 h_2 + G_7 h_7 = G_4 h_4 + G_3 h_3$$

Le entalpie sono tutte note (vedi tabella); è nota anche la portata  $G_2 = G_1$  ;

Inoltre il bilancio di massa dell'intero sistema e quello del lato primario dello scambiatore a superficie danno

$$G_3 = G_1 ; G_7 = G_4 ;$$

per cui sostituendo nelle precedenti si ha

$$G_1 h_2 + G_4 h_7 = G_4 h_4 + G_1 h_3 \rightarrow G_4 = G_1 \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_7} = 2625 \text{ kg/s}$$

**Domanda 4:** la portata di aria nello scambiatore a superficie si ricava dal bilancio energetico del medesimo

$$G_4 (h_5 - h_6) = G_9 (h_9 - h_8) = G_9 c_p (T_9 - T_8) \rightarrow G_9 = G_4 \frac{(h_5 - h_6)}{c_p (T_9 - T_8)} = 15615 \text{ kg/s}$$

(nota: questo valore è altissimo e dimostra che lo scambiatore non potrebbe essere realizzato in questo modo: si ricorre infatti ad una torre di raffreddamento a umido).

**Domanda 5:** La massima potenza ricavabile dal vapore endogeno si otterrebbe in un sistema aperto a regime che riporta il medesimo allo stato morto, e vale quindi

$$W'_{m,\max} = G_1 (a_{f,1} - a_{f,0}) = 69.1 \text{ MW}$$

Conseguentemente il rendimento exergetico dell'impianto vale

$$\varepsilon = \frac{W'_m}{W'_{m,\max}} = 0.71$$

**Domanda 6** Scaricando il vapore nell'atmosfera, la pressione all'uscita della turbina dovrebbe essere maggiore od uguale ad 1 bar (in questo caso la turbina viene detta a contropressione), per cui si otterrebbe una potenza minore all'asse della stessa. Inoltre le sostanze inquinanti contenute nel vapore endogeno verrebbero scaricate nell'atmosfera, ed infine bisognerebbe usare acqua di sorgente per reintegrare il contenuto del pozzo geotermico.

Volendo analizzare il problema anche quantitativamente, in questo caso, lasciando invariati gli altri dati, da una turbina a contropressione che scarica ad 1 bar ( $T_2 = 100\text{ °C}$ ) si otterrebbero solo 34.4 MW, con un rendimento exergetico dell'impianto di 0.5.

