

Cognome e Nome _____ Matricola _____ Firma _____

Teoria (10 punti a domanda, penalizzazione errori secondo quanto indicato sul portale BEEP)

1. Scrivere le equazioni di partenza e le ipotesi necessarie per ricavare l'equazione generale della conduzione
2. Scrivere le equazioni di partenza e le ipotesi necessarie per ricavare l'equazione generale delle trasformazioni politropiche
3. Scrivere il bilancio entropico per un generico sistema fluente, indicando il significato dei termini che vi compaiono, e riportare un esempio di trasformazione irreversibile con variazione di entropia nulla.

Esercizi (penalizzazione errori secondo quanto indicato su BEEP)

Esercizio 1 (9 punti) Un recipiente chiuso e perfettamente rigido e adiabatico, di volume $V = 0.5$ l, è inizialmente pieno di acqua a pressione atmosferica e temperatura $T_{ai} = 10$ °C. Nel recipiente viene immersa una sfera di rame ($r = 8900$ kg/m³, $c = 385$ J/kgK, $k=200$ W/mK), di diametro $D = 70$ mm e avente temperatura $T_{1i} = 200$ °C. A causa dell'immersione della sfera, un corrispondente volume di liquido esce dal recipiente che viene poi immediatamente richiuso dopo l'immersione. Trascurando l'eventuale evaporazione locale dell'acqua e ipotizzando che sia l'acqua sia la sfera siano approssimabili a perfettamente incompressibili, determinare la temperatura finale del sistema liquido + sfera, una volta raggiunto lo stato di equilibrio, la corrispondente variazione totale di entropia rispetto allo stato iniziale. Ipotizzando che il coefficiente di scambio termico convettivo nell'acqua sia pari a 50 W/m²K indicare se l'analisi dell'evoluzione nel tempo della temperatura della sfera può essere affrontata con il metodo dei parametri concentrati.

Esercizio 2 (12 punti) Una pompa di calore reale con COP pari a 4 riscalda una portata d'acqua di 1 kg/s, a pressione ambiente, dalla temperatura di 30 °C a 50 °C e raffredda una portata d'acqua di falda di 1.5 kg/s alla temperatura iniziale di 20 °C. Si determini:

- la temperatura reale di uscita dell'acqua di falda $T_{out,R} =$ _____
- la temperatura che avrebbe all'uscita l'acqua di falda se a pari comportamento della sorgente calda la pompa di calore fosse ideale (ciclo di Carnot reversibile) $T_{out,I} =$ _____

La potenza elettrica necessaria alla pompa di calore (considerare quella reale) è fornita da un ciclo motore reale che riceve una potenza termica pari a 50 kW da una sorgente di calore isoterma a temperatura di 1200°C e cede potenza termica al flusso d'acqua già riscaldato dalla pompa di calore. Si determini:

- la temperatura finale dell'acqua $T_{out2} =$ _____
- il rendimento di secondo principio del motore (approssimando la sorgente fredda ad isoterma alla temperatura media tra ingresso e uscita) $\eta_{II} =$ _____

Esercizio 3 (12 punti) Una portata di vapore alla temperatura di 600 °C e 150 bar, pari a 200 kg/s, viene espansa in una turbina con rendimento isoentropico η_{is} pari a 0.75 fino alla pressione di 20 kPa. In seguito entra nel lato mantello di un condensatore, dove condensa completamente con un coefficiente di scambio termico convettivo h_e pari a 4000 W/(m² K). Una portata di acqua a pressione ambiente scorre, alla velocità di 2 m/s, all'interno di tubi con $k=20$ W/(m K), del diametro interno di 30 mm e spessore 2 mm, riscaldandosi da una temperatura di 25°C a 35°C. Si determini:

- il titolo di vapore all'uscita dalla turbina $X =$ _____
- il coefficiente di scambio termico convettivo nei tubi $h_i =$ _____
- lunghezza e numero dei tubi $L =$ _____ $N =$ _____

Correlazioni per il calcolo di h per flusso all'interno di tubi

Re > 4000 Turbolento

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

n = 0.4 riscaldamento

n = 0.3 raffreddamento

Re < 2500 Laminare

$$Nu = 4.36$$

flusso termico costante

$$Nu = 3.66$$

T superficiale costante

Proprietà dell'acqua in transizione di fase

Press. p kPa	Temp. sat. T _m °C	Volume specifico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. v _l	Vapore sat. v _v	Liquido sat. u _l	Evap. u _{lv}	Vapore sat. u _v	Liquido sat. h _l	Evap. h _{lv}	Vapore sat. h _v	Liquido sat. s _l	Evap. s _{lv}	Vapore sat. s _v
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700

Proprietà del vapore surriscaldato

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
p = 15.0 MPa (342.24°C)				p = 17.5 MPa (354.75°C)				p = 20.0 MPa (365.81°C)				
Sat.	0.010337	2455.5	2610.5	5.3098	0.007920	2390.2	2528.8	5.1419	0.005834	2293.0	2409.7	4.9269
350	0.011470	2520.4	2692.4	5.4421					0.009942	2619.3	2818.1	5.5540
400	0.015649	2740.7	2975.5	5.8811	0.012447	2665.0	2902.9	5.7213	0.012695	2806.2	3060.1	5.9017
450	0.018445	2879.5	3156.2	6.1404	0.015174	2844.2	3109.7	6.0184	0.014768	2942.9	3238.2	6.1401
500	0.02080	2996.8	3308.6	6.3443	0.017358	2970.3	3274.1	6.2383	0.016555	3062.4	3393.5	6.3348
550	0.02293	3104.7	3448.6	6.5199	0.019288	3083.9	3421.4	6.4230	0.018178	3174.0	3537.6	6.5048
600	0.02491	3206.6	3582.3	6.6776	0.02106	3191.5	3560.1	6.5866	0.02113	3281.4	3675.3	6.6582
650	0.02680	3310.3	3712.3	6.8224	0.02274	3296.0	3693.9	6.7357	0.02385	3386.4	3809.0	6.7993
700	0.02861	3410.9	3840.1	6.9572	0.02434	3398.7	3824.6	6.8736	0.02645	3492.7	3926.4	6.9254
800	0.03210	3610.9	4092.4	7.2040	0.02738	3601.8	4081.1	7.1244	0.02897	3797.5	4326.4	7.2830
900	0.03546	3811.9	4343.8	7.4279	0.03031	3804.7	4335.1	7.3507	0.03145	4003.1	4582.5	7.4925
1000	0.03875	4015.4	4596.6	7.6348	0.03316	4009.3	4589.5	7.5589				
1100	0.04200	4222.6	4852.6	7.8283	0.03597	4216.9	4846.4	7.7531				

Proprietà dell'acqua (liquida) alla pressione di 1 atm

Temperatura K	Densità kg/m ³	Calore specifico J/(KgK)	Conducibilità termica W/(mK)	Diffusività termica m ² /s	Viscosità dinamica kg/(m s)	Viscosità cinematica m ² /s	Numero di Prandtl Pr
Acqua (T in K)							
273.2	000	4205	0.564	1.34 × 10 ⁻⁷	1.79 × 10 ⁻³	1.79 × 10 ⁻⁶	13.4
280	000	4197	0.582	1.39 × 10 ⁻⁷	1.44 × 10 ⁻³	1.44 × 10 ⁻⁶	10.4
300	997	4177	0.608	1.46 × 10 ⁻⁷	0.857 × 10 ⁻³	0.86 × 10 ⁻⁶	5.88
320	989	4176	0.637	1.54 × 10 ⁻⁷	0.579 × 10 ⁻³	0.59 × 10 ⁻⁶	3.79
340	980	4187	0.659	1.61 × 10 ⁻⁷	0.423 × 10 ⁻³	0.43 × 10 ⁻⁶	2.69
360	967	4204	0.674	1.66 × 10 ⁻⁷	0.320 × 10 ⁻³	0.33 × 10 ⁻⁶	2.00
373.2	958	4220	0.681	1.68 × 10 ⁻⁷	0.282 × 10 ⁻³	0.29 × 10 ⁻⁶	1.75
400	937	4241	0.686	1.73 × 10 ⁻⁷	0.219 × 10 ⁻³	0.23 × 10 ⁻⁶	1.35
450	890	4419	0.673	1.71 × 10 ⁻⁷	0.153 × 10 ⁻³	0.17 × 10 ⁻⁶	1.01
500	832	4647	0.635	1.64 × 10 ⁻⁷	0.118 × 10 ⁻³	0.14 × 10 ⁻⁶	0.86
550	756	5272	0.571	1.43 × 10 ⁻⁷	0.095 × 10 ⁻³	0.13 × 10 ⁻⁶	0.88
600	650	6691	0.481	1.11 × 10 ⁻⁷	0.076 × 10 ⁻³	0.12 × 10 ⁻⁶	1.05

Soluzioni

Soluzione esercizio 1

```
%DATI
P=1e5;
rhoCu=8900;
cCu=385;
kCu=200;
rhoH2O=1000;
cH2O=4186;
Ds=70e-3;
Tsi=200+273.15;
TH2Oi=10+273.15;
Vltot=0.5e-3;
hH2O=50;

%SOLUZIONE
Vs=4/3*pi*(Ds/2)^3;
VH2O=Vltot-Vs; %dopo l'uscita del liquido causa immersione delle sfere

Ms=rhoCu*Vs;
MH2O=VH2O*rhoH2O;

Tf=(MH2O*cH2O*TH2Oi+Ms*cCu*Tsi)/(MH2O*cH2O+Ms*cCu);

DSs=Ms*cCu*log(Tf/Tsi);
DSH2O=MH2O*cH2O*log(Tf/TH2Oi);
DStot=DSs+DSH2O;

As=4*pi*Dp^2/4;
Bi=hH2O*(Vs/As)/kCu;
```

As	0.0154	Tsi	473.1500
Bi	0.0029	VH2O	3.2041e-04
DSH2O	256.8233	Vltot	5.0000e-04
DSs	-198.1220	Vs	1.7959e-04
DStot	58.7014	cCu	385
Ds	0.0700	cH2O	4186
MH2O	0.3204	hH2O	50
Ms	1.5984	kCu	200
P	100000	rhoCu	8900
TH2Oi	283.1500	rhoH2O	1000
Tf	342.9079		

Soluzione esercizio 2

```
%DATI
MH=1;
MC=1.5;
THi=30+273.15;
THu=50+273.15;
TCi=20+273.15;
cp=4186;
COP=4;

%SOLUZIONE

%T di uscita dell'acqua di falda con la pompa di calore reale
QSH=MH*cp*(THu-THi);
QH=-QSH;
L=-QH/COP;
QC=-QH-L;
```

```

QSC=-QC;
TCu=TCi+QSC/(MC*cp);

%T di uscita dell'acqua di falda con la pompa di calore ideale
%per avere potenza meccanica minima deve essere DS = 0,
%da cui dovendo mantenere la stessa QSH l'unica incognita è TCu_id:
%DS=MC*cp*log(TCu_id/TCi)+MH*cp*log(THu/THi)=0;
%log(TCu_id/TCi)=-MH/MC*log(THu/THi);
TCu_id=TCi*(THu/THi)^(-MH/MC);

%la sorgente fredda del ciclo era la sorgente calda della pompa di calore
Tfacqua=THu+QSCm/(MH*cp);

THm=1200+273.15;
QSHm=-QHm;
TCm_med=(Tfacqua+THu)/2;
etaIm_id=1-TCm_med/THm;
etaIm=-Lm/QHm;
etaIIm=etaIm/(1-TCm_med/THm);

Lm_id=-QHm*etaIm_id;

COP          4          TCi          293.1500
L            20930      TCm_med      326.6223
Lm           -20930      TCu          283.1500
Lm_id        -3.8914e+04 TCu_id       280.9262
MC            1.5000     THi          303.1500
MH            1          THm          1.4732e+03
QC            62790      THu          323.1500
QCm           -29070     Tfacqua      330.0946
QH            -83720     cp           4186
QHm           50000      etallm       0.5379
QSC           -62790     etalm        0.4186
QSCm          29070      etalm_id     0.7783
QSH            83720
QSHm          -50000

```

Soluzione esercizio 3

```

%dati
Mv=200;
Tv1=600+273.15;
Pv1=175e5;
etaIS=0.75;
Pv2=20e3;

he=4000;

wa=2;
k=20;
Dti=30e-3;
st=2e-3;

Tai=25+273.15;
Tau=35+273.15;

%proprietà dell'acqua a 30 °C, da tabella
mia=8.57e-4;
ka=0.608;
cpa=4177;
rhoa=997;

```

```

%soluzione

%calcolo turbina
%calcolo turbina ideale
%da tabelle del vapore
hv1=3582.3e3;
sv1=6.6776e3;
sv2=sv1;
hls2=251.4e3;
hvs2=2609.7e3;
sls2=0.8320e3;
svs2=7.9085e3;
xv2id=(sv2-sls2)/(svs2-sls2);
hv2id=xv2id*hvs2+(1-xv2id)*hls2;
lidturb=hv2id-hv1;
Lidturb=Mv*lidturb;
%calcolo turbina reale
lrturb=etaIS*lidturb;
Lrturb=etaIS*Lidturb;

%calcolo entalpia e titolo di uscita reali
hv2r=hv1+lrturb;
xv2r=(hv2r-hls2)/(hvs2-hls2);
Tv2=60.06+273.15; %in uscita dalla turbina si è ancora in bifase a Tsat(Pv2)

%calcolo scambiatore
%il vapore condensa completamente
Qh=Mv*(hls2-hv2r);
%cedendo Qh alla portata d'acqua nei tubi
Ma=-Qh/(cpa*(Tau-Tai));

%la portata scorre in Nt tubi di sezione nota

%calcolo numero di tubi [essendo Ma=rhoa*wa*(Acs_lt*Nt)]
Acs_lt=pi*Dti^2/4;
Nt=Ma/(rhoa*wa*Acs_lt);

%calcolo coefficiente convettivo interno
Rea=rhoa*wa*Dti/mia;
Pra=cpa*mia/ka;

%il moto è turbolento con l'acqua che si scalda, quindi:
Nua=0.023*Rea^0.8*Pra^0.4;
hi=Nua*ka/Dti;

%non c'è fouling, per cui si ha:
%Ktot=1 / [ 1/(hi Ai) + ln(De/Di)/(2 pi lt L Nt) + 1/(he Ae) ]
%Trascurando la resistenza conduttiva dei tubi e ragionando sul coefficiente di scambio
per u. di superficie
%lato interno:
Dte=Dti+st;
Ui=(1/hi+Dti/Dte*1/he)^-1;
%per confronto, se non si fosse trascurata la resistenza conduttiva
Ui_vero=(1/hi+Dti*log(Dte/Dti)/(2*k)+Dti/Dte*1/he)^-1;

%ed essendo Q°=Ui Ai DTml
DT0=Tv2-Tai;
DTL=Tv2-Tau;
DTml=(DTL-DT0)/log(DTL/DT0);
Alat_Nt=-Qh/(Ui*DTml);

% e infine: A_lati_Nt=pi*Dte*Lt*Nt, da cui:
Lt=Alat_Nt/(pi*Dte*Nt);

```

Acs_1t	7.0686e-04	Uj_vero	2.3612e+03
Alat_Nt	5.7785e+03	cpa	4177
DT0	35.0600	etalS	0.7500
DTL	25.0600	he	4000
DTml	29.7807	hi	7.1052e+03
Dte	0.0320	hls2	251400
Dti	0.0300	hv1	3582300
Lid turb	-2.7656e+08	hv2id	2.1995e+06
Lrturb	-2.0742e+08	hv2r	2.5452e+06
Lt	7.3765	hvs2	2609700
Ma	1.0983e+04	k	20
Mv	200	ka	0.6080
Nt	7.7922e+03	lid turb	-1.3828e+06
Nua	350.5880	lrturb	-1.0371e+06
Pra	5.8876	mia	8.5700e-04
Pv1	17500000	rhoa	997
Pv2	20000	sls2	832
Qh	-4.5876e+08	st	0.0020
Rea	6.9802e+04	sv1	6.6776e+03
Tai	298.1500	sv2	6.6776e+03
Tau	308.1500	svs2	7.9085e+03
Tv1	873.1500	wa	2
Tv2	333.2100	xv2id	0.8261
Ui	2.6658e+03	xv2r	0.9726