

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Impianti di condizionamento in
ambito aeronautico»***

Tutor universitario:

Prof. Pierfrancesco Brunello

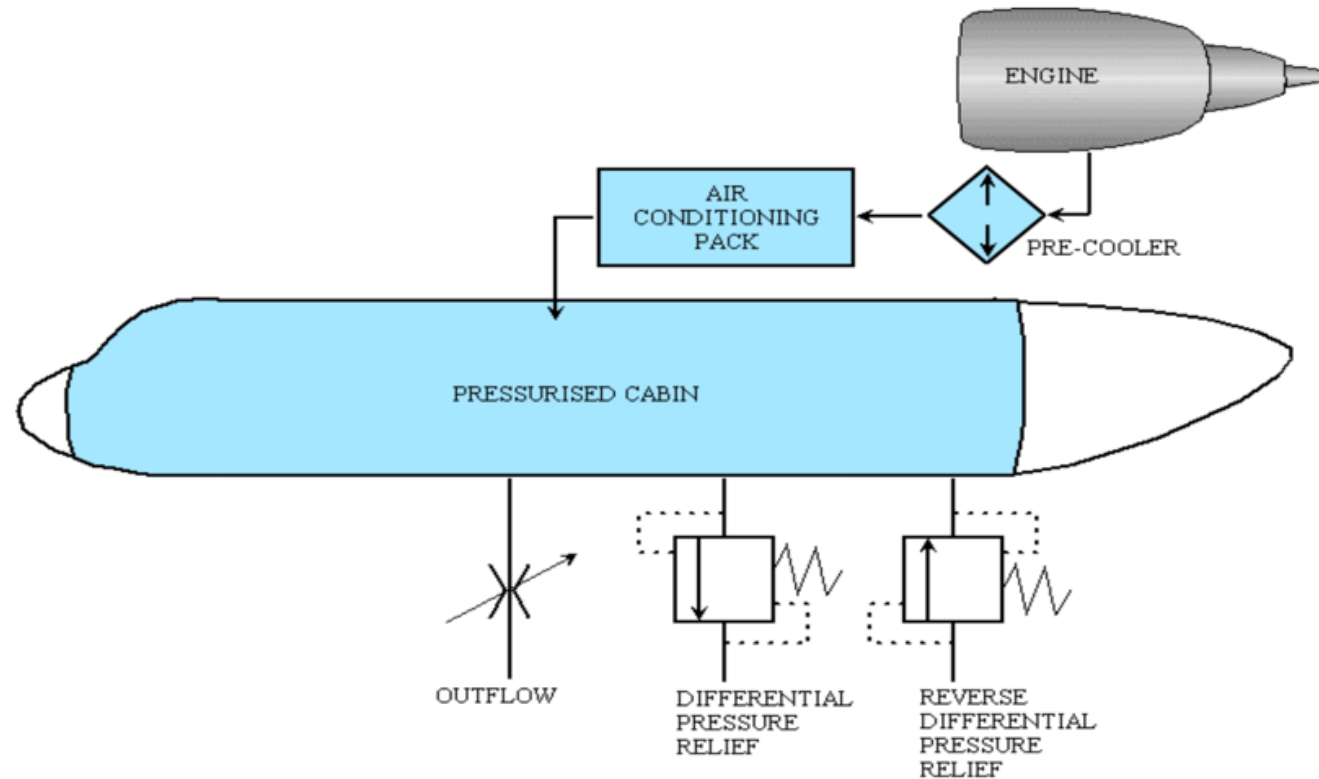
Laureando:

Marco Stocco Mat.1032338

Padova, 21/09/2023

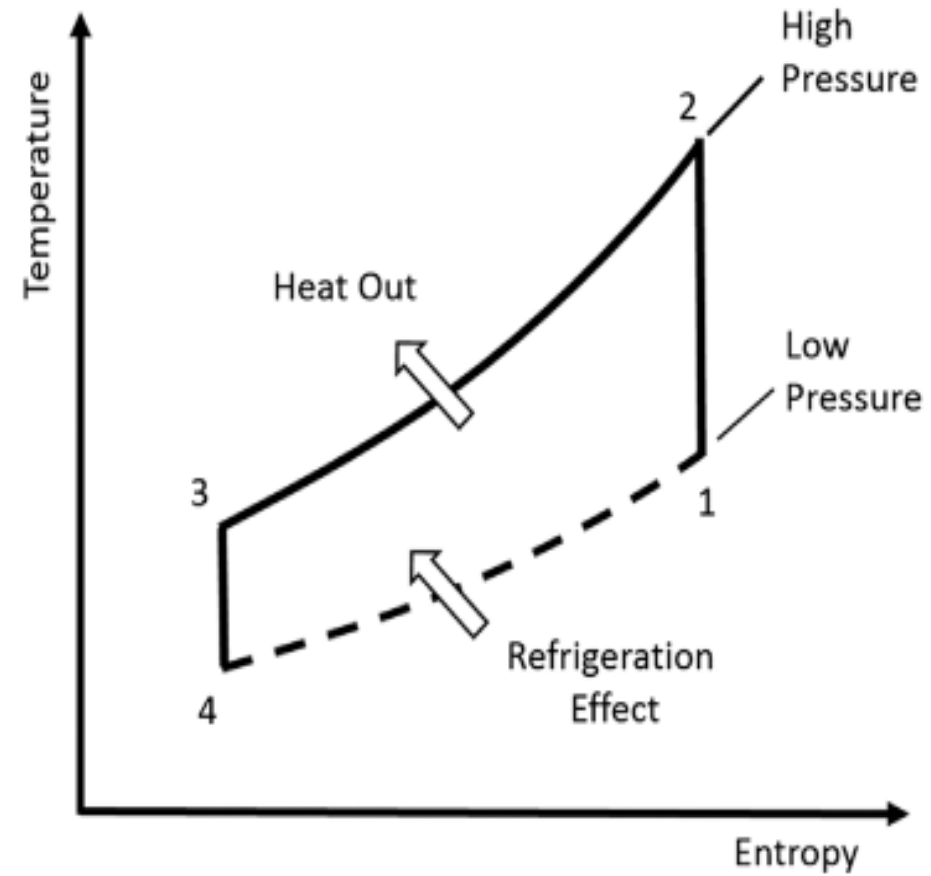
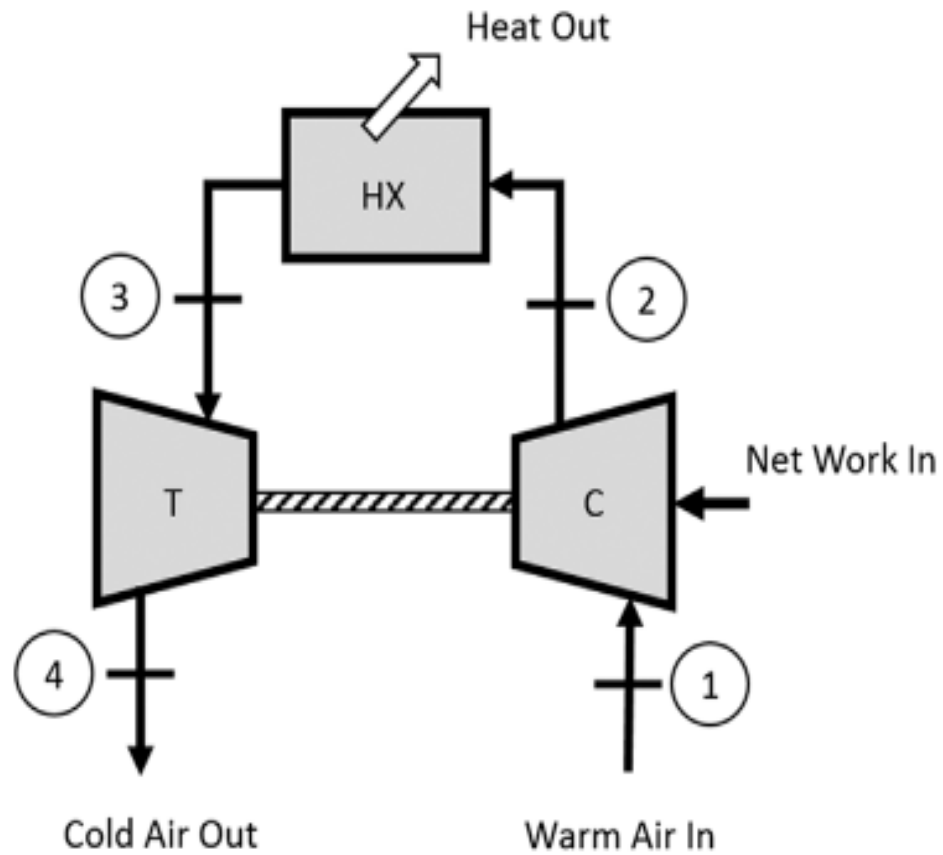
Per garantire le condizioni di benessere e di sopravvivenza all'interno della cabina degli aerei è necessario:

- Mantenere la pressione dell'aria ad un livello sufficiente affinché i polmoni possano funzionare correttamente
- Mantenere una temperatura confortevole in ogni condizione, bilanciando i carichi termici presenti
- Garantire un ricambio d'aria in modo da smaltire inquinanti ed umidità emessa dai passeggeri a bordo

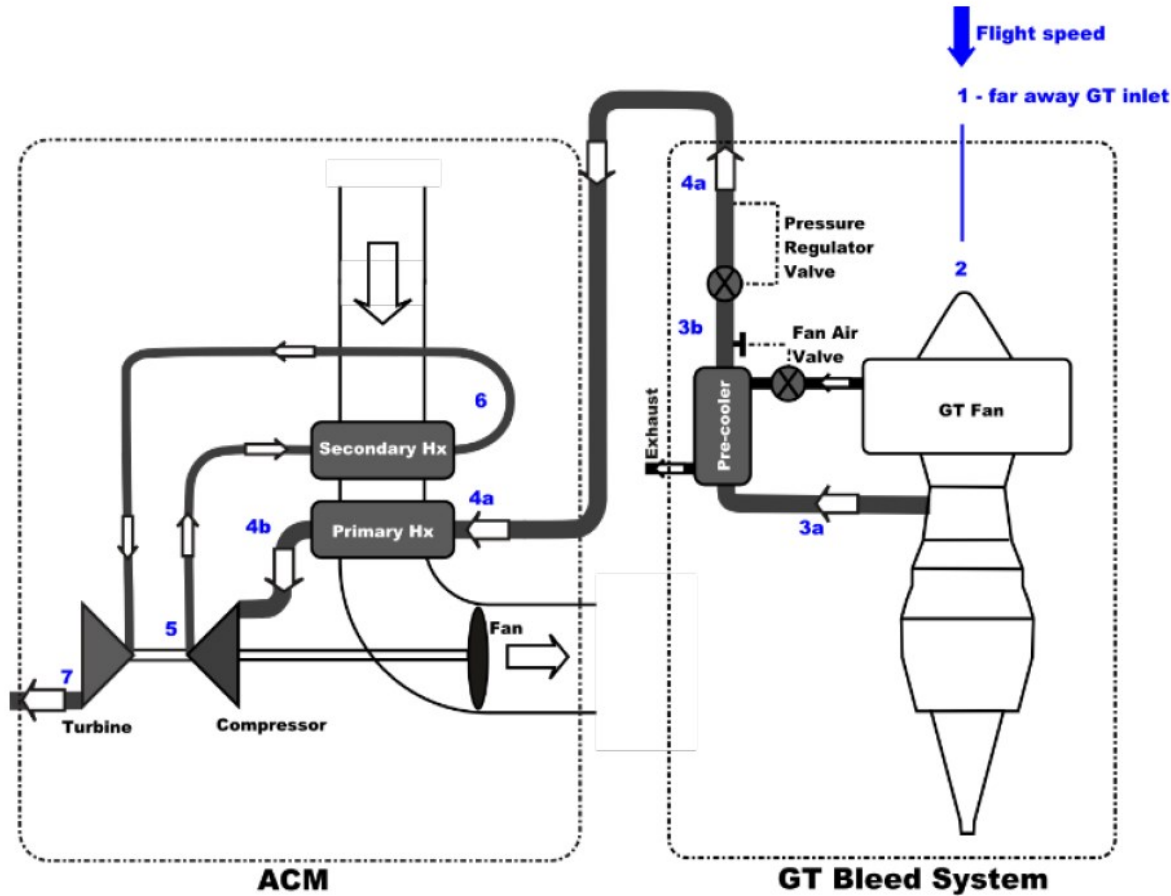


Schema dell'impianto di pressurizzazione [4]

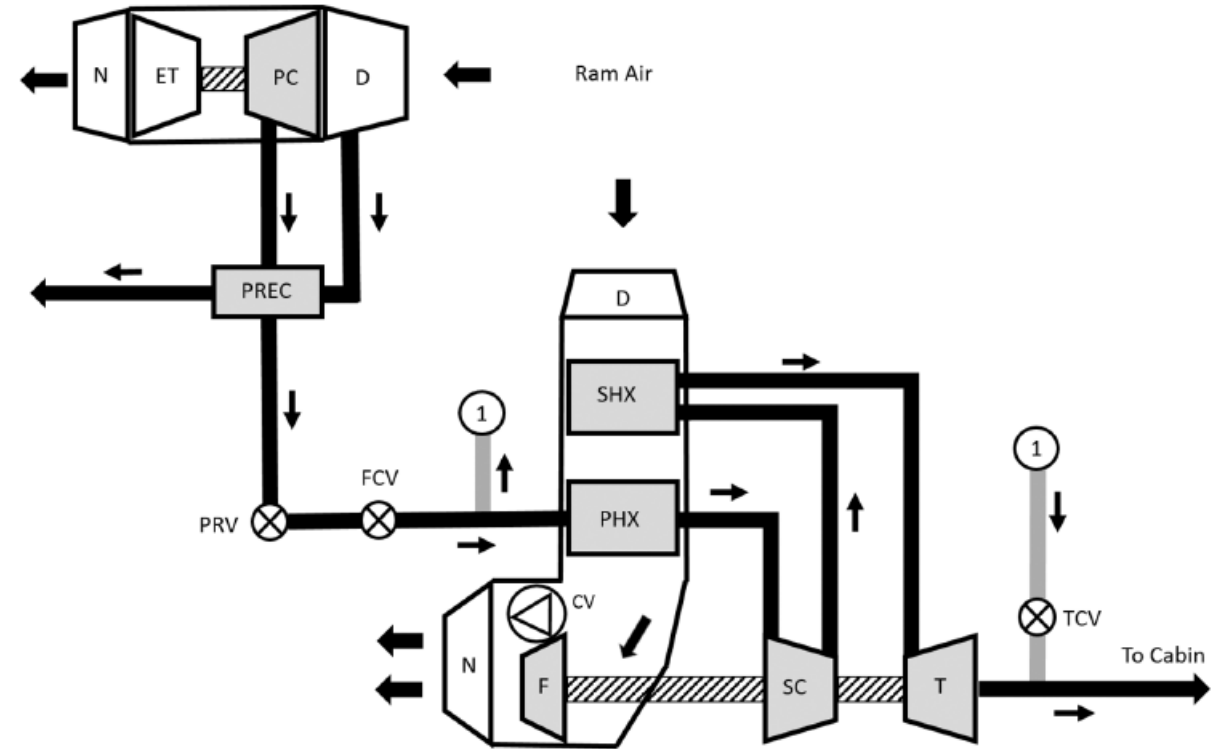
La pressurizzazione in cabina viene controllata elettronicamente con la modulazione di una valvola di deflusso. Avendo una portata di massa d'aria continua in entrata dal condizionatore e regolando quella che lascia la fusoliera, si riesce a controllare la pressione in quest'ultima.



Schema e diagramma T-s del Ciclo Bryton- Joule inverso [1]



Architettura di una ACM 3Wheel e del relativo impianto di bleed [2]



ACM con evidenza del circuito di Trim air [3]

1-2 Recupero di pressione statica nel diffusore

$$h_2 = h_1 + \frac{w_1^2}{2} \quad T_2 = T_1 + \frac{w_1^2}{2c_p} \quad \frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{(K-1)Ma^2}{2}$$

$$\frac{P_{2i}}{P_1} = \left(\frac{T_{2i}}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \eta_{diff} = \frac{P_2 - P_1}{P_{2i} - P_1} \quad W_d = \dot{m}_b c_p (T_2 - T_1)$$

2-3a Compressione nel motore

$$\frac{T_{3is}}{T_2} = \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \eta_{iprim} = \frac{\dot{m}_b c_p (T_{3is} - T_2)}{\dot{m}_b c_p (T_3 - T_2)} = \frac{(T_{3is} - T_2)}{(T_3 - T_2)}$$

$$W_{prim} = \dot{m}_b c_p (T_3 - T_2) = \frac{\dot{m}_b c_p T_2}{\eta_{iprim}} \left[\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

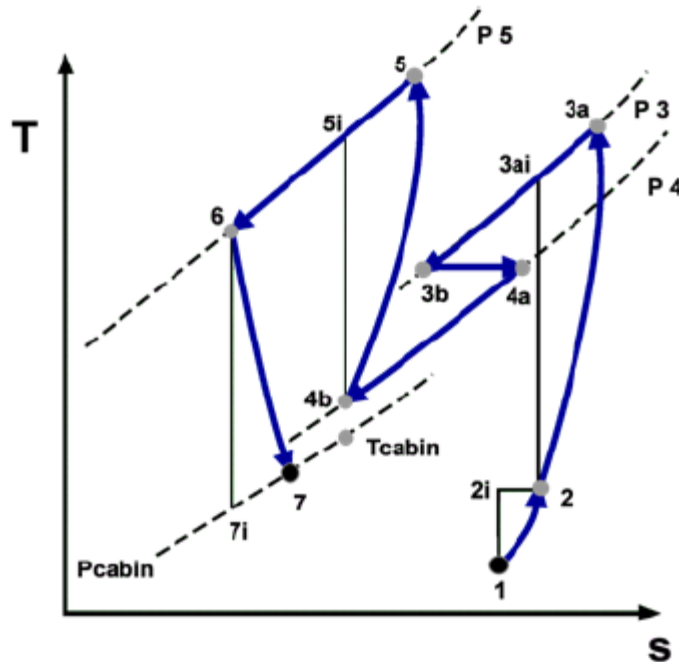


Diagramma T-S Ciclo 3 wheel [5]

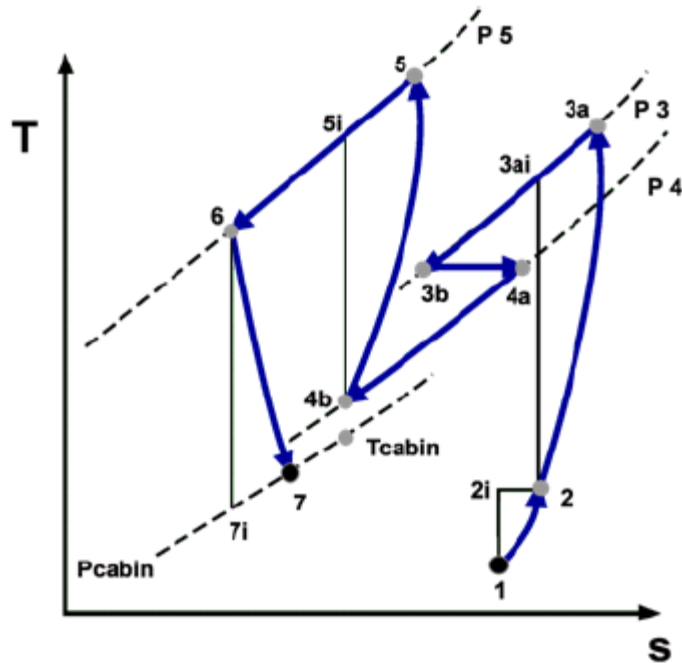


Diagramma T-S Ciclo 3 wheel [5]

L'aria in uscita dal compressore è troppo calda e ad una pressione troppo elevata per l'utilizzo, nel tratto 3a-3b viene raffreddata da uno scambiatore supposto isobaro; nel tratto 3b-4a la pressione viene regolata per mezzo di una valvola di laminazione.

4a-4b Raffreddamento nello scambiatore primario

$$\varepsilon_{prim} = \frac{T_{4in} - T_{4out}}{T_{4in} - T_2}$$

$$q_{prim} = \dot{m}_b c_p (T_{4in} - T_{4out})$$

4b-5 Compressione nel compressore secondario

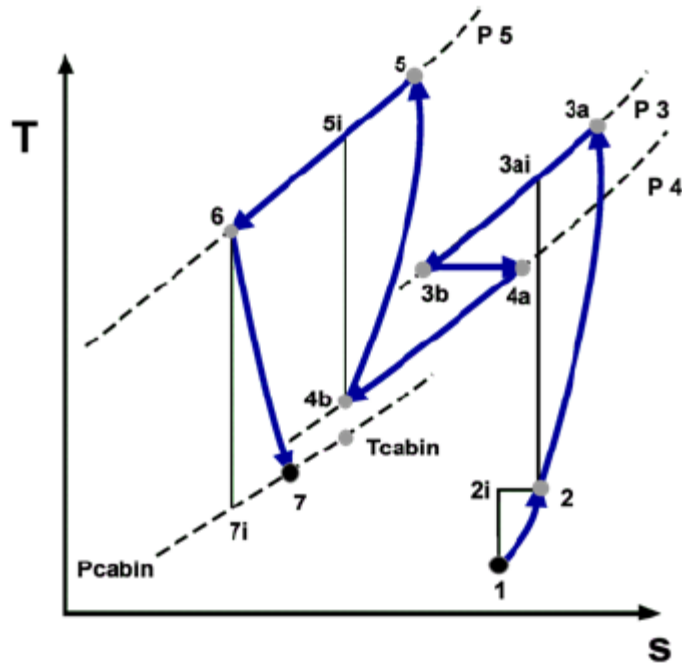


Diagramma T-S Ciclo 3 wheel [5]

$$\frac{T_{5is}}{T_{4out}} = \left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \eta_{isec} = \frac{\dot{m}_b c_p (T_{5is} - T_{4out})}{\dot{m}_b c_p (T_5 - T_{4out})} = \frac{(T_{5is} - T_{4out})}{(T_5 - T_{4out})}$$

$$W_{sec} = \dot{m}_b c_p (T_5 - T_{4out}) = \frac{\dot{m}_b c_p T_{4out}}{\eta_{isec}} \left[\left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

5-6 Raffreddamento nello scambiatore secondario

$$\varepsilon_{sec} = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_2} \quad q_{sec} = \dot{m}_b c_p (T_5 - T_6)$$

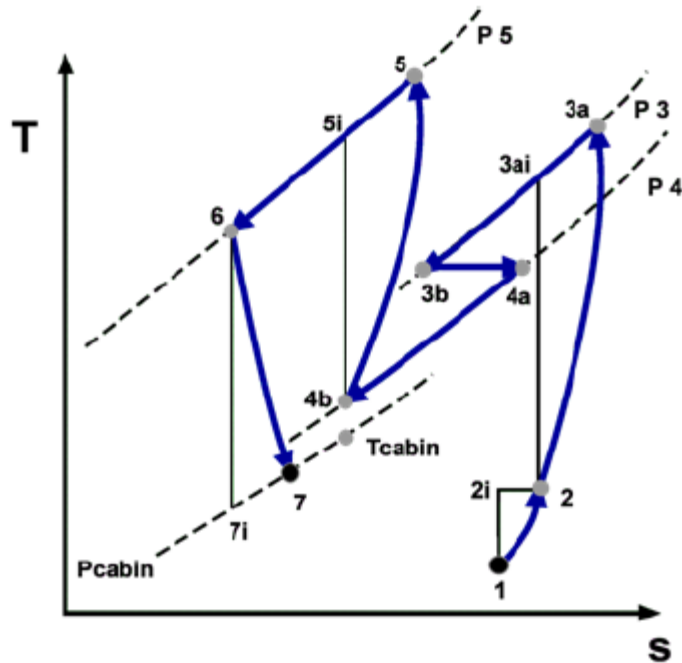


Diagramma T-S Ciclo 3 wheel [5]

6-7 Espansione in turbina

$$\frac{T_{7is}}{T_6} = \left(\frac{P_7}{P_6} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\eta_{iesp} = \frac{\dot{m}_b c_p (T_6 - T_7)}{\dot{m}_b c_p (T_6 - T_{7i})} = \frac{(T_6 - T_7)}{(T_6 - T_{7i})}$$

$$W_{esp} = \dot{m}_b c_p (T_6 - T_7) = \dot{m}_b c_p T_6 \left[1 - \left(\frac{P_7}{P_5} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_{iesp}$$

Sapendo che il lavoro prodotto dalla turbina viene ripartito tra compressore e ventilatore, si introduce il coefficiente di ripartizione dell'energia α

$$W_{sec} = \alpha W_{esp}$$

Conoscendo le relazioni per il calcolo dei lavori di compressione ed espansione, inserendole nell'equazione di bilancio scritta sopra, si riesce a ricavare il valore dell'incognita P_5 , in uscita dal compressore secondario tramite la relazione:

$$\frac{\dot{m}_b c_p T_{4out}}{\eta_{isec}} \left[\left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] - \alpha \left\{ \dot{m}_b c_p T_6 \left[1 - \left(\frac{P_7}{P_5} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_{iesp} \right\} = 0 \quad [6]$$

Poiché l'aria in uscita dalla turbina è generalmente troppo fredda per essere immessa direttamente in cabina, viene miscelata con una certa portata, detta portata di bypass, di aria calda spillata direttamente dal compressore primario. Le portate elaborate vengono calcolate risolvendo il sistema:

$$\begin{cases} \dot{m}_b c_p T_{in} = \dot{m}_{acm} c_p T_7 + \dot{m}_{bp} c_p T_{4in} \\ \dot{m}_b = \dot{m}_{acm} + \dot{m}_{bp} \end{cases}$$

Per la valutazione delle prestazioni degli impianti verranno usati 2 indici, il COP che valuta il solo effetto frigorifero della macchina, ed il COP_p che tiene conto anche del lavoro speso per la pressurizzazione

$$COP = \frac{q}{W_{diff} + W_{prim} - W_{press}} \quad COP_p = \frac{q}{W_{diff} + W_{prim}}$$

Dove l'effetto frigorifero q si calcola tramite

$$q = \dot{m}_b c_p (T_{cab} - T_7)$$

Il lavoro di pressurizzazione, svolto da compressore primario ed in parte dal diffusore si calcola con

$$W_{press} = \frac{\dot{m}_b c_p T_2}{\eta_{iprim}} \left[\left(\frac{P_{cab}}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + W_d \quad [6]$$

Viene simulato l'andamento dei parametri prestazionali COP e COPp

- Al variare della temperatura di immissione dell'aria in cabina
- Al variare della velocità dell'aereo, variando quindi il numero di Mach
- Al variare della percentuale di ripartizione tra ventola e compressore, della potenza sviluppata dall'espansione in turbina
- Durante un volo completo, supponendo le seguenti condizioni

TEMPO VOLO	ALTITUDINE	P1	T1	Mach	P cabina
s	m	kPa	K	\	kPa
0	0	101	293	0	101
500	4000	62	262	0,2	95
1000	8500	30	233	0,6	85
1500	11000	22	216	0,8	80
2000	11000	22	216	0,8	80
2500	11000	22	216	0,8	80
3000	6500	44	246	0,5	90
3500	3000	70	268	0,3	100
4000	0	101	293	0	110

Vengono, inoltre, mantenuti costanti i seguenti parametri, riferiti ad un aereo in volo in quota di crociera con necessità di raffreddare la cabina

DATI INPUT												
P1	T1	Mach	η diffusore	η compr prim	P spillamento	T4in	P4	ϵ prim	η compr sec	ϵ sec	η exp	P cabina
kPa	K				kPa	K	kPa					kPa
20	216	0,5	0,84	0,82	250	473	200	0,8	0,82	0,8	0,77	110

DATI INPUT PORTATE			
qcab	Tcab	Tin	portata totale
W	K	K	kg/s
20000	293	283	1,98

In questo caso la portata d'aria totale elaborata viene mantenuta costante al valore di 1,1 kg/s; ovvero la portata necessaria a garantire un effetto frigorifero di 20 kW con una temperatura in entrata di 279°K

DIFFUSORE			
T2=T2i	P2i	P2	lavoro speso
K	kPa	kPa	J
226,8	23,7	23,1	12000

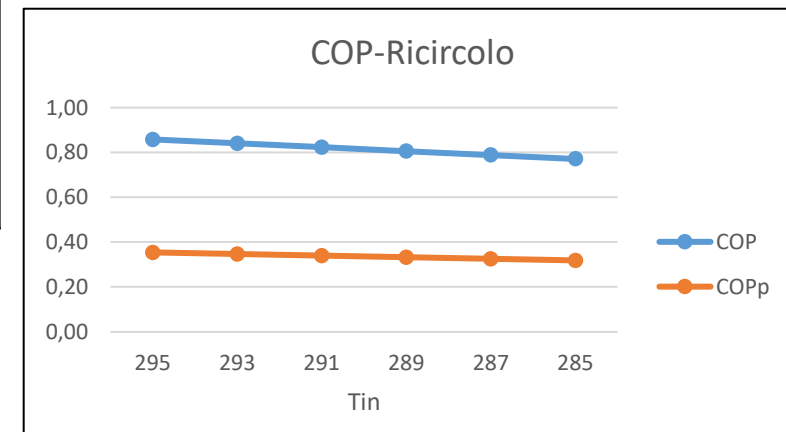
COMPRESSORE MOTORE		
T3i	T3	lavoro compressione
K	K	J
447,7	496,2	299338

COMPRESSORE SECONDARIO			
T5i	T5	lavoro compressione	P5
K	K	J	kPa
317,8	326,9	36317	327,3
		36726	
		37134	
		37542	
		37950	
		38358	
		38766	
39174			
39582			

Tin	mACM	mBP
K	kg/s	kg/s
295	0,71	0,39
293	0,71	0,39
291	0,72	0,38
289	0,73	0,37
287	0,74	0,36
285	0,75	0,35
283	0,75	0,35
281	0,76	0,34
279	0,77	0,33

TURBINA		
T7i	T7	lavoro prodotto
K	K	J
180,8	195,9	36317
		36726
		37134
		37542
		37950
		38358
		38766
39174		
39582		

CALCOLO COP			
Tin	Qc	COPp	COP
K	J		
295	110057	0,35	0,86
293	107835	0,35	0,84
291	105613	0,34	0,82
289	103390	0,33	0,81
287	101168	0,32	0,79
285	98946	0,32	0,77
283	96724	0,31	0,75
281	94502	0,30	0,74
279	92279	0,30	0,72



N MACH
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1

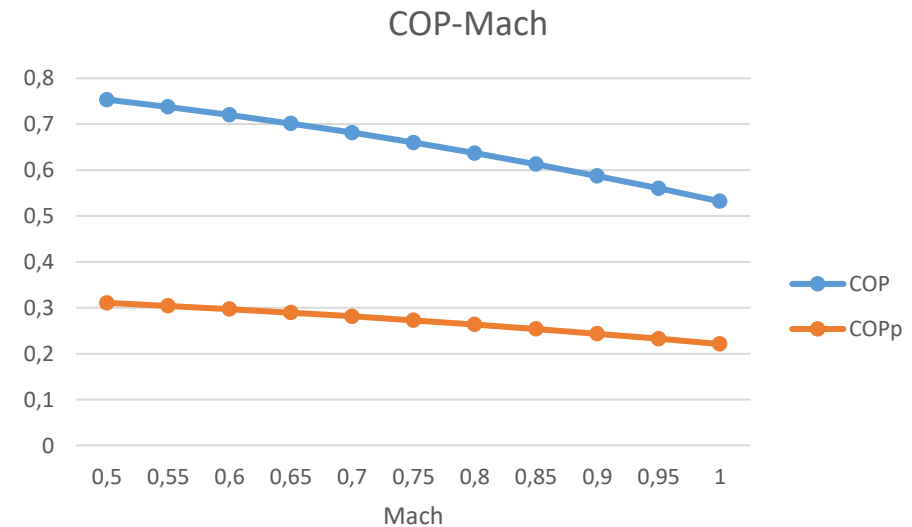
DIFFUSORE			
T2=T2i	P2i	P2	lavoro speso
K	kPa	kPa	J
226,8	23,7	23,1	21600
229,1	24,6	23,8	26136
231,6	25,5	24,6	31104
234,3	26,6	25,5	36504
237,2	27,7	26,5	42336
240,3	29,0	27,6	48600
243,6	30,5	28,8	55296
247,2	32,1	30,1	62424
251,0	33,8	31,6	69984
255,0	35,7	33,2	77976
259,2	37,9	35,0	86400

COMPRESSORE MOTORE		
T3i	T3	lavoro compressione
K	K	J
447,7	496,2	538809
448,3	496,4	534759
449,0	496,7	530260
449,6	496,9	525297
450,3	497,1	519856
451,0	497,3	513924
451,7	497,4	507488
452,4	497,5	500535
453,1	497,5	493054
453,9	497,5	485033
454,6	497,4	476464

COMPRESSORE SECONDARIO			
T5i	T5	lavoro compressione	P5
K	K	J	kPa
317,8	326,9	72952	327,3
320,0	329,3	73738	327,9
322,5	331,9	74600	328,6
325,2	334,7	75539	329,4
328,1	337,7	76553	330,1
331,2	341,0	77644	331,0
334,6	344,5	78811	331,9
338,1	348,2	80056	332,8
341,9	352,1	81378	333,7
345,9	356,3	82777	334,7
350,1	360,7	84254	335,8

TURBINA		
T7i	T7	lavoro prodotto
K	K	J
180,8	195,9	72952
182,3	197,7	73738
184,1	199,6	74600
185,9	201,7	75539
187,9	203,9	76553
190,1	206,3	77644
192,4	208,9	78811
194,9	211,6	80056
197,5	214,5	81378
200,3	217,5	82777
203,2	220,7	84254

CALCOLO COP			
N MACH	Qc	COPp	COP
	J		
0,5	174102,8	0,310671	0,75345
0,55	170625,7	0,304202	0,737537
0,6	166818,5	0,297166	0,720199
0,65	162681,3	0,289571	0,701454
0,7	158214,4	0,281424	0,681318
0,75	153418,2	0,272732	0,659809
0,8	148292,8	0,263499	0,636942
0,85	142838,7	0,253728	0,61273
0,9	137055,9	0,243422	0,587185
0,95	130945	0,232581	0,560317
1	124506,1	0,221201	0,532134



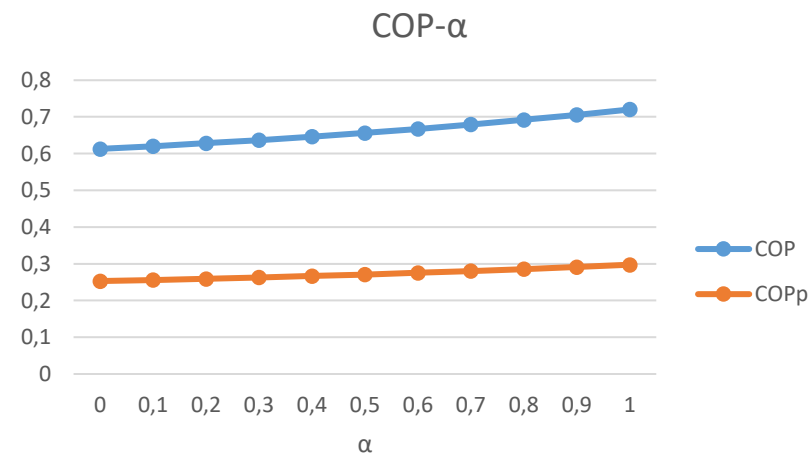
DIFFUSORE			
T2=T2i	P2i	P2	lavoro speso
K	kPa	kPa	J
231,6	25,5	24,6	31104

COMPRESSORE MOTORE		
T3i	T3	lavoro compressione
K	K	J
449,0	496,7	530260

TURBINA		
T7i	T7	lavoro prodotto
K	K	J
203,3	212,0	41349
202,0	211,2	43434
200,6	210,3	45708
199,1	209,3	48194
197,4	208,2	50915
195,6	207,0	53897
193,7	205,7	57168
191,6	204,4	60760
189,2	202,9	64703
186,7	201,3	69028
184,1	199,6	73765

CALCOLO COP			
ALFA	Qc	COPp	COP
	J		
0	141904,2	0,252785	0,612638
0,1	143619,8	0,255841	0,620044
0,2	145474,3	0,259144	0,62805
0,3	147480,2	0,262718	0,636711
0,4	149651,1	0,266585	0,646083
0,5	152000,4	0,27077	0,656225
0,6	154541,2	0,275296	0,667195
0,7	157285,5	0,280184	0,679043
0,8	160243,1	0,285453	0,691811
0,9	163420,3	0,291113	0,705528
1	166818,5	0,297166	0,720199

ALFA	COMPRESSORE SECONDARIO			
	T5i	T5	lavoro compressione	P5
K	K	J	kPa	
0	279,8	279,8	0	200,0
0,1	282,4	282,9	4343	206,4
0,2	285,1	286,3	9142	213,5
0,3	288,2	290,0	14458	221,7
0,4	291,6	294,2	20366	231,0
0,5	295,4	298,8	26948	241,8
0,6	299,7	304,0	34301	254,2
0,7	304,4	309,8	42532	268,6
0,8	309,8	316,3	51762	285,4
0,9	315,8	323,7	62125	305,2
1	322,5	331,9	73765	328,6



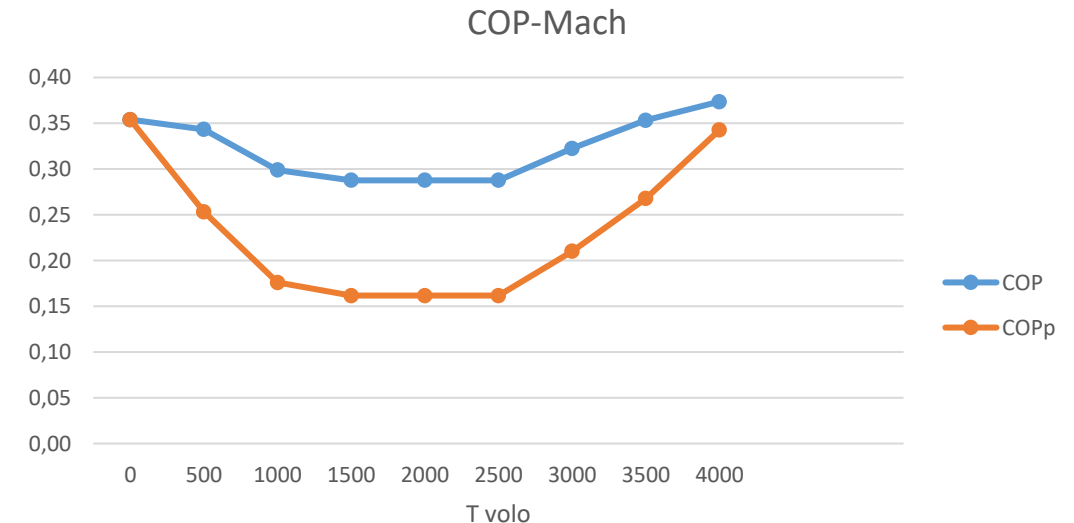
DIFFUSORE			
T2=T2i	P2i	P2	lavoro speso
K	kPa	kPa	J
293,0	101,0	101,0	0
264,1	63,8	63,5	4192
249,8	38,3	36,9	33552
243,6	33,5	31,7	55296
243,6	33,5	31,7	55296
243,6	33,5	31,7	55296
258,3	52,2	50,9	24600
272,8	74,5	73,8	9648
293,0	101,0	101,0	0

COMPRESSORE MOTORE			
T3i	T3	lavoro compressione	
K	K	J	
379,6	398,6	211216	
390,7	418,5	308813	
431,3	471,2	442789	
439,6	482,6	477892	
439,6	482,6	477892	
439,6	482,6	477892	
407,1	439,7	362809	
386,6	411,6	277563	
379,6	398,6	211216	

COMPRESSORE SECONDARIO			
T5i	T5	lavoro compressione	P5
K	K	J	kPa
371,6	381,0	84773	306,3
380,0	391,1	101349	331,1
389,0	402,2	119351	359,5
393,7	407,9	128731	375,0
393,7	407,9	128731	375,0
393,7	407,9	128731	375,0
384,0	396,1	109441	343,7
375,6	385,8	92612	317,9
367,3	375,7	76155	294,0

TURBINA		
T7i	T7	lavoro prodotto
K	K	J
226,2	245,6	105966
222,7	243,4	112932
219,1	241,1	120282
217,2	239,9	124029
217,2	239,9	124029
217,2	239,9	124029
221,0	242,3	116262
224,5	244,5	109285
228,1	246,8	102266

CALCOLO COP			
T VOLO	Qc	COPp	COP
	J		
0	74756	0,35	0,35
500	79233	0,25	0,34
1000	83832	0,18	0,30
1500	86126	0,16	0,29
2000	86126	0,16	0,29
2500	86126	0,16	0,29
3000	81333	0,21	0,32
3500	76903	0,27	0,35
4000	72332	0,34	0,37



- [1] C. Bringhenti, J.T. Tomita e C.R. de Andrade, *Air conditioning systems for aeronautical applications: a review* in The aeronautical journal, aprile 2020, volume 124, n°1274, p.508
- [2] A.P.P. Santos, C.R. Andrade, E.L. Zaparoli, *A Thermodynamic Study of Air Cycle Machine for Aeronautical Applications*, in International Journal of Thermodynamics (IJoT), Settembre 2014, p.119
- [3] C. Bringhenti, J.T. Tomita e C.R. de Andrade, *Air conditioning systems for aeronautical applications: a review* in The aeronautical journal, aprile 2020, volume 124, n°1274, p.512
- [4] I. Moir, A. Seabridge, *Aircraft systems*, in Longman scientific and technical, 1992
- [5] A.P.P. Santos, C.R. Andrade, E.L. Zaparoli, *A Thermodynamic Study of Air Cycle Machine for Aeronautical Applications*, in International Journal of Thermodynamics (IJoT), Settembre 2014, p.119
- [6] A.P.P. Santos, C.R. Andrade, E.L. Zaparoli, *A Thermodynamic Study of Air Cycle Machine for Aeronautical Applications*, in International Journal of Thermodynamics (IJoT), Settembre 2014, p.121