

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

«Il Sistema di Climatizzazione dell'Airbus A320»

Tutor universitario: Prof. Pierfrancesco Brunello

Laureando: *Alessandro Bertoli*

Padova, 17/07/2023



Fonte: [14]

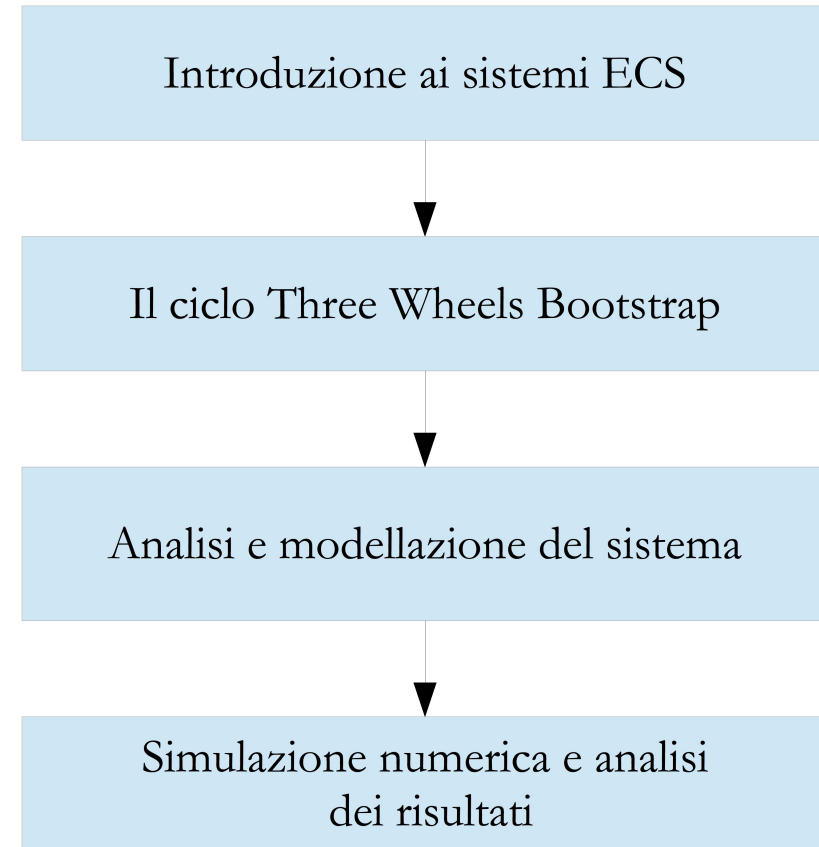


Fonte: [15]

- Alla fine degli anni 70 il mercato dei jet di linea narrow-body era dominato da McDonnell Douglas e dalla Boeing
- Le compagnie aeree erano limitate a scegliere tra il DC-9 o il Boeing 737-200
- Volontà da parte degli stakeholder europei di porre fine al dominio delle due case costruttrici straniere
- Nascita del progetto JET (Joint European Transport) che fu il precursore della Airbus A320 Family
- L'A320 fu il primo membro della famiglia seguito poi dall'A321, dall'A319 e infine dall'A318
- Nel 2010 fu annunciata la versione A320 neo (New Engine Option) distinguendosi dalla precedente, poi denominata ceo (Current Engine Option) che era dotata di motori IAE V2500 oppure CFM-56

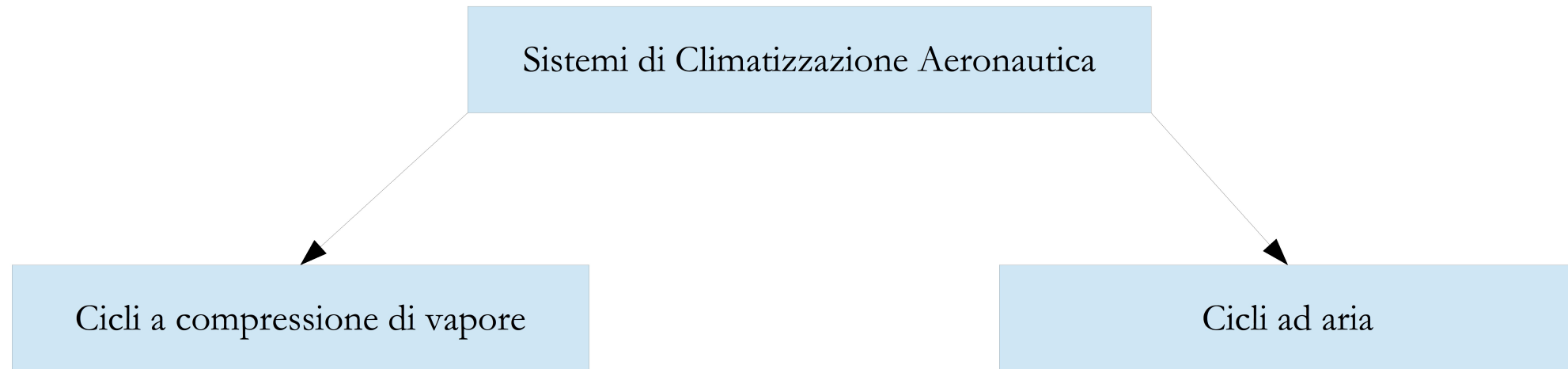


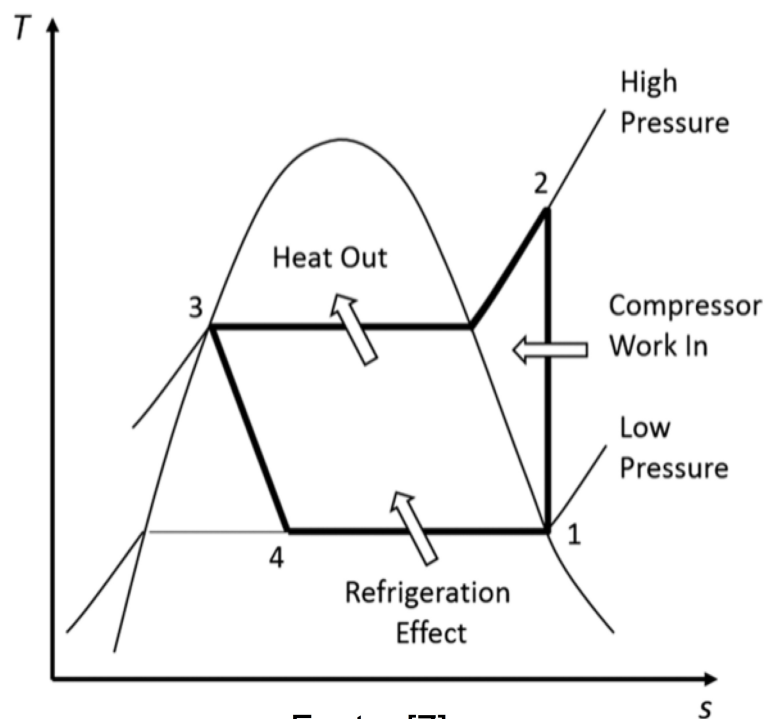
Fonte: [13]



L'obiettivo del presente lavoro è quello di analizzare, modellare e simulare il sistema di climatizzazione dell'Airbus A320 nella versione ceo equipaggiata con motori turbofan IAE V2500

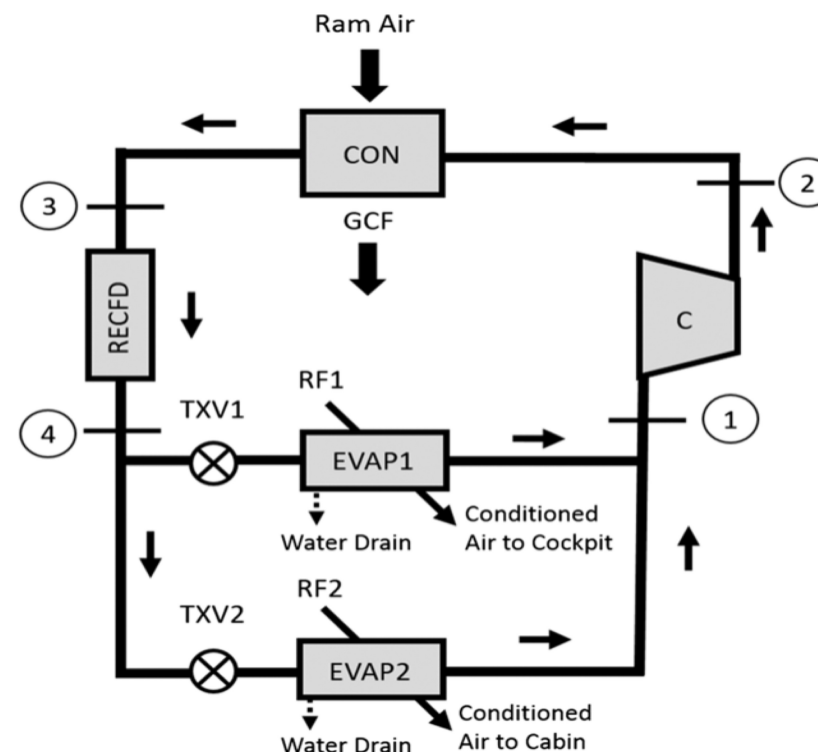
- L'Environmental Control System (ECS) può essere definito come l'insieme di tutti quei componenti che, attraverso il controllo di pressione, temperatura, umidità relativa e concentrazione di contaminanti, consente il mantenimento del comfort dei passeggeri, dell'equipaggio, nonché l'integrità del carico pagante e dei componenti elettronici dell'aeromobile.
- Il sistema di climatizzazione è parte del sistema ECS
- Fino agli anni cinquanta i velivoli erano dotati di sistemi in grado di realizzare solamente il riscaldamento dell'aria della cabina





Fonte: [7]

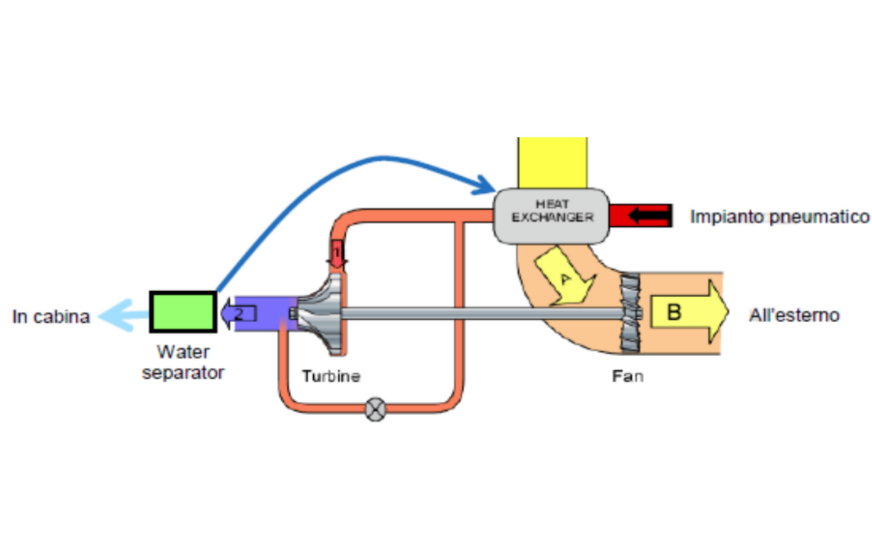
- Alla base del funzionamento vi è il ciclo Rankine inverso
- Elevati valori di COP, generalmente compresi tra 3 e 4
- Più complesso e meno leggero a parità di effetto refrigerante rispetto ai sistemi con ciclo ad aria



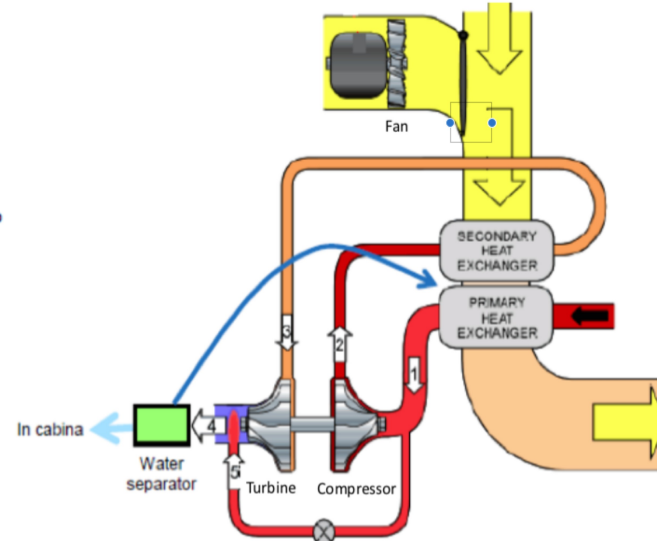
Fonte: [7]

- Componenti principali: compressore, condensatore, filtro, valvola di laminazione, evaporatore e fan.
- Tipicamente si fa uso di due evaporatori
- Non consente la pressurizzazione della cabina

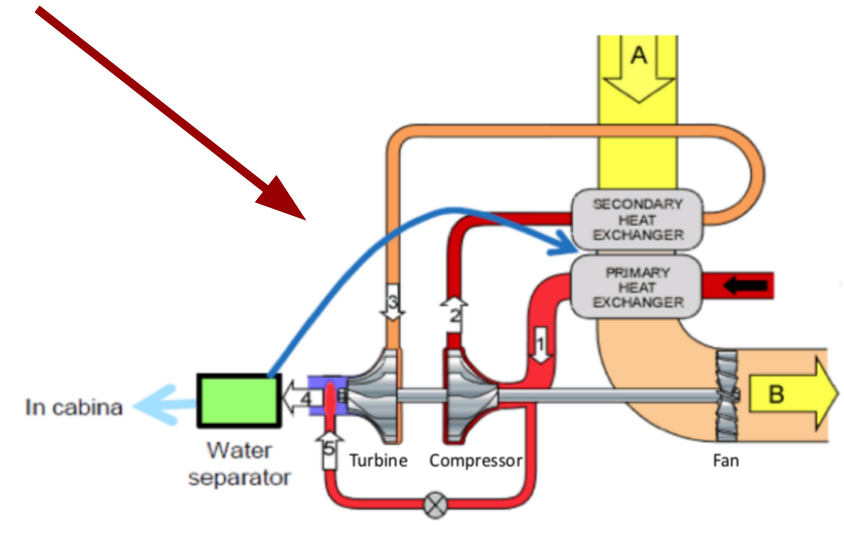
- La soluzione ad oggi più utilizzata per la quasi totalità degli aerei commerciali di grandi dimensioni è quella dei cicli ad aria con Air Cycle Machine (ACM).
- Si basano sul ciclo di Brayton-Joule inverso
- Sfruttano spillamenti di aria compressa proveniente dal sistema pneumatico
- Esistono diverse architetture di ACM, tra le quali:



Fonte:[9]



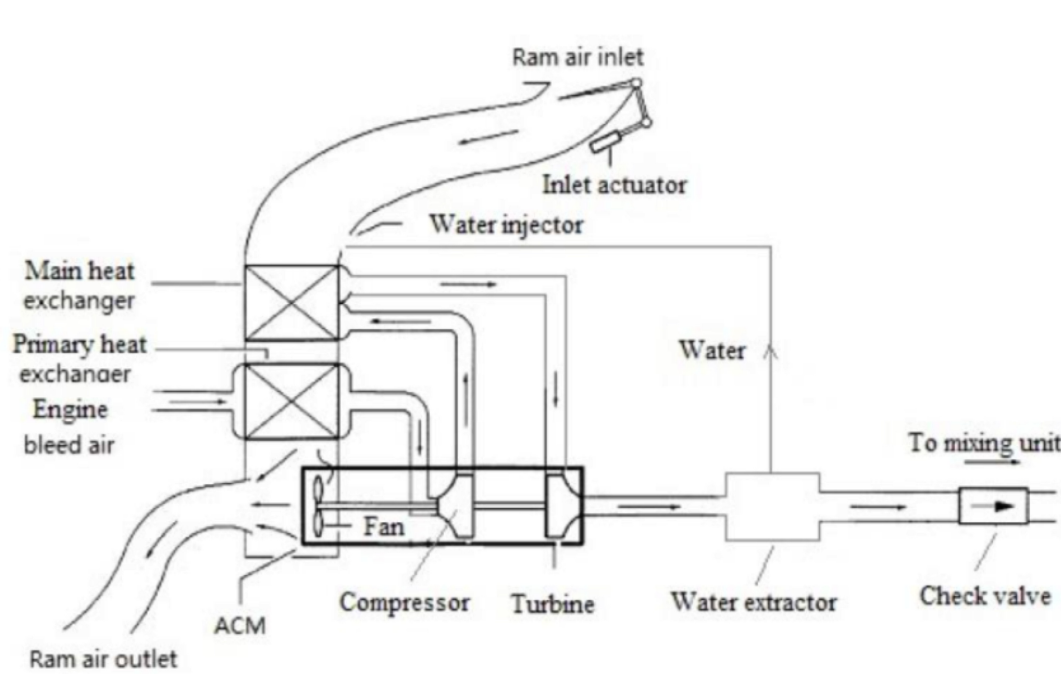
Fonte:[9]



Fonte:[9]

- In tutte le configurazioni precedenti, la regolazione della temperatura del flusso in uscita avviene variando l'apertura della valvola di Bypass

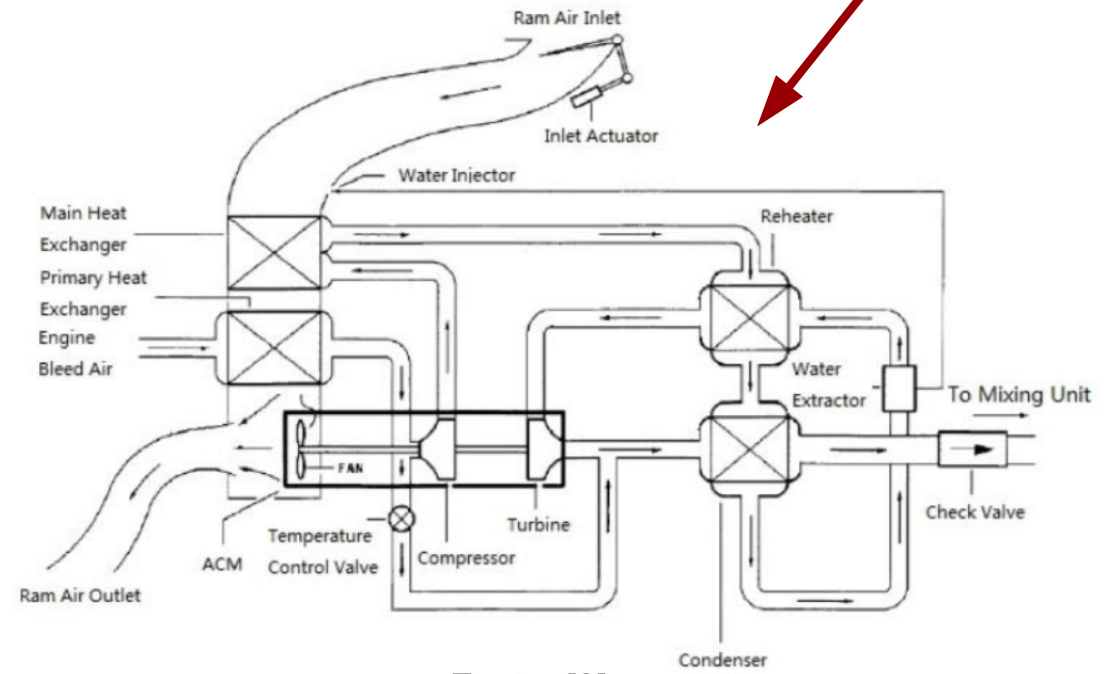
- Sebbene il modello trascurerà l'umidità, vi sono due modalità di estrazione dell'acqua dall'aria:



Fonte: [9]

Low Pressure Water Separation (LPWS)

- Limitazione sulla temperatura di scarico della turbina attorno a 2-3°C



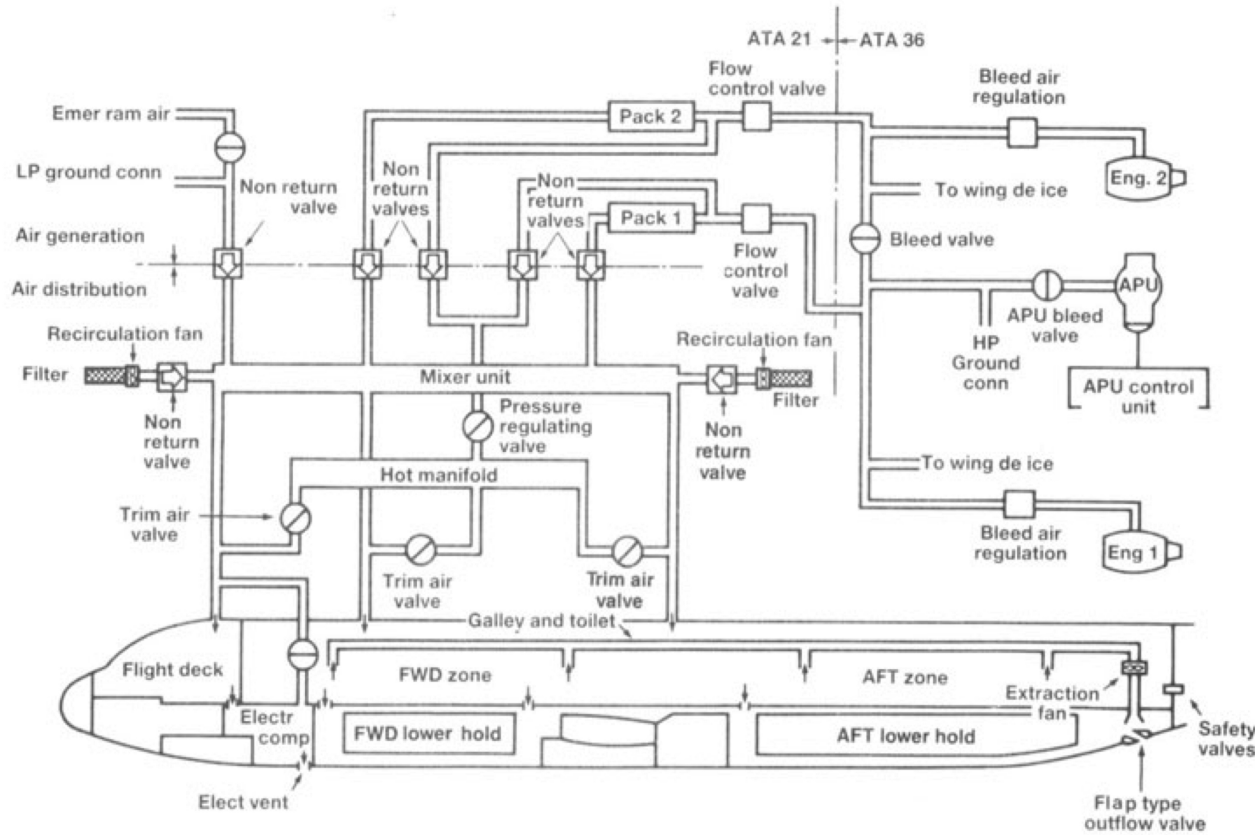
Fonte: [9]

High Pressure Water Separation (HPWS)

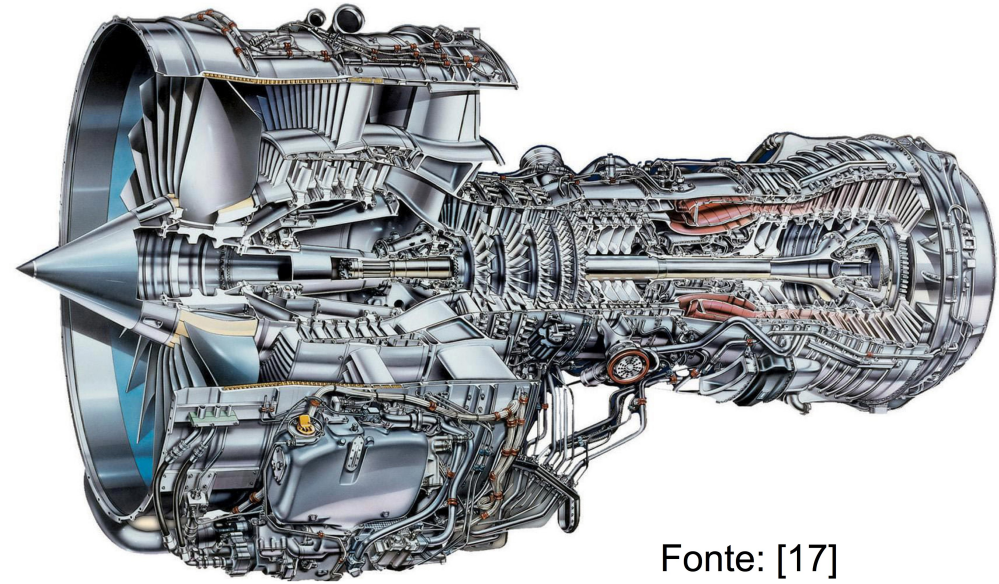
- Nessun limite alla temperatura di scarico della turbina
- Consente riduzione della portata a parità di effetto frigorifero

A320 Air conditioning system 21

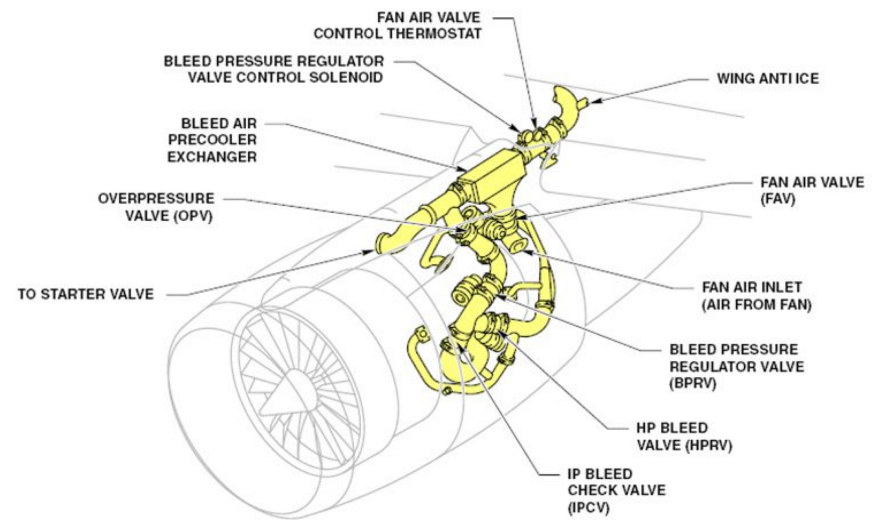
Fig. 21-1 Overall system schematic
www.british-caledonian.com



Page 21.03

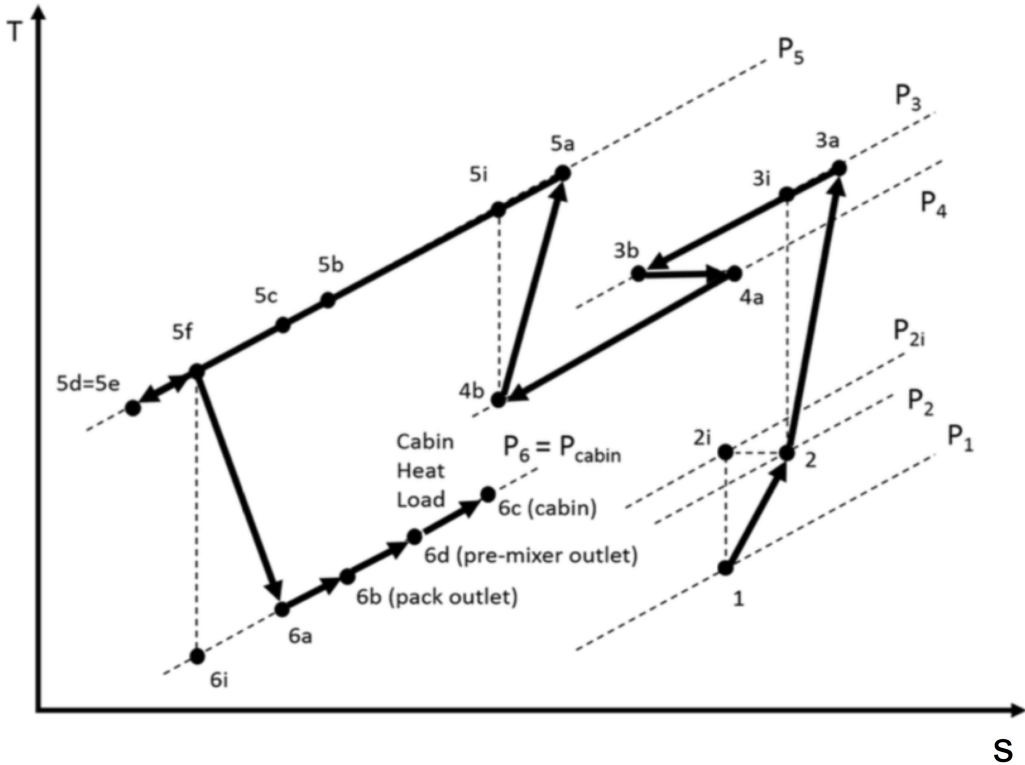


Fonte: [17]

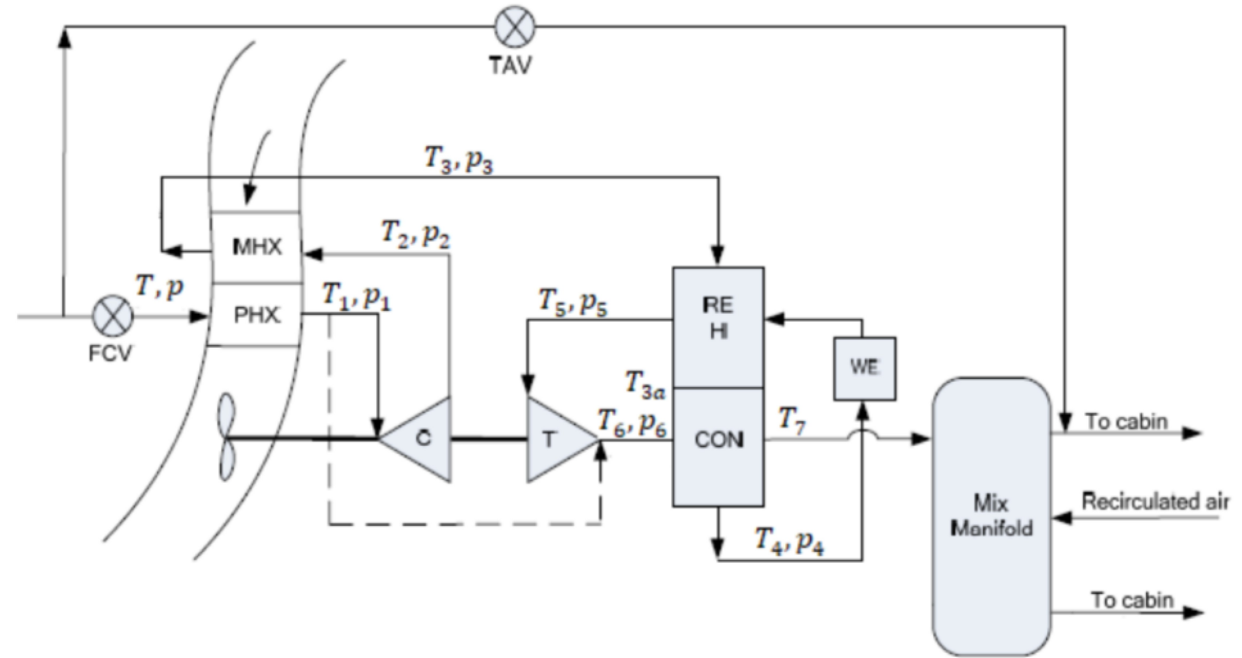


Fonte: [18]

www.dii.unipd.it



Fonte: [7]



Fonte: [9]

Discutibile la collocazione dei punti 2 e 2i sul primo grafico. Il modello riguarda la parte di sistema a valle del pre-cooler.

SCAMBIATORI DI CALORE

PHE:

$$\epsilon_{PHE} = \frac{|q_{PHE}|}{|q_{max,PHE}|} = \frac{T - T_1}{T - T_{iPHE}} \quad \text{oppure} \quad \epsilon_{PHE} = \frac{T_{uPHE} - T_{iPHE}}{T - T_{iPHE}}$$

$$|q_{PHE}| = \dot{m}c_p(T - T_1) = \dot{m}_s c_p(T_{uPHE} - T_{iPHE})$$

MHE:

$$\epsilon_{MHE} = \frac{|q_{MHE}|}{|q_{max,MHE}|} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_{iMHE}} \quad \text{oppure} \quad \epsilon_{MHE} = \frac{T_{uMHE} - T_{iMHE}}{T_2 - T_{iMHE}}$$

$$|q_{MHE}| = (1 - \beta)\dot{m}c_p(T_2 - T_3) = \dot{m}_s c_p(T_{uMHE} - T_{iMHE})$$

REHEATER:

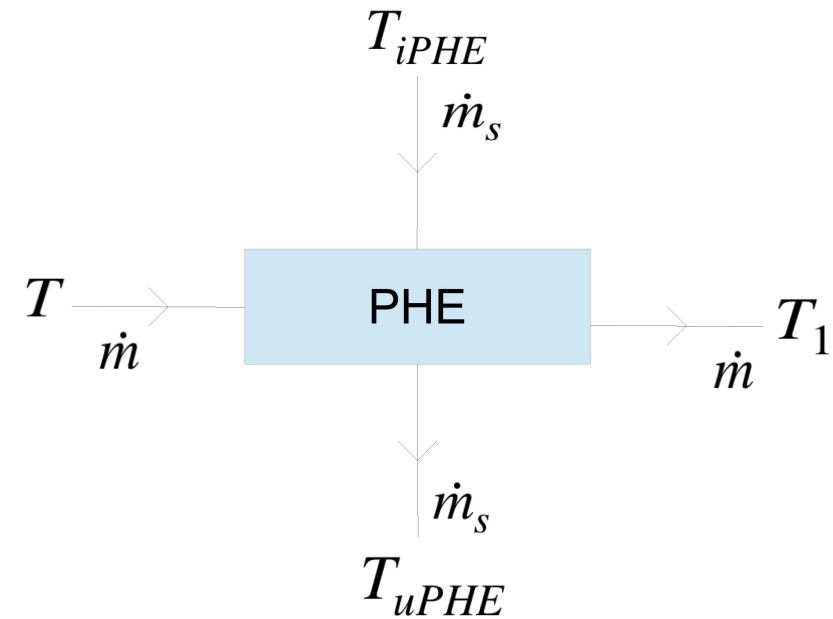
$$|q_R| = (1 - \beta)\dot{m}c_p(T_3 - T_{3a}) = (1 - \beta)\dot{m}c_p(T_5 - T_4)$$

$$\epsilon_R = \frac{T_3 - T_{3a}}{T_3 - T_4} = \frac{T_5 - T_4}{T_3 - T_4}$$

CONDENSER:

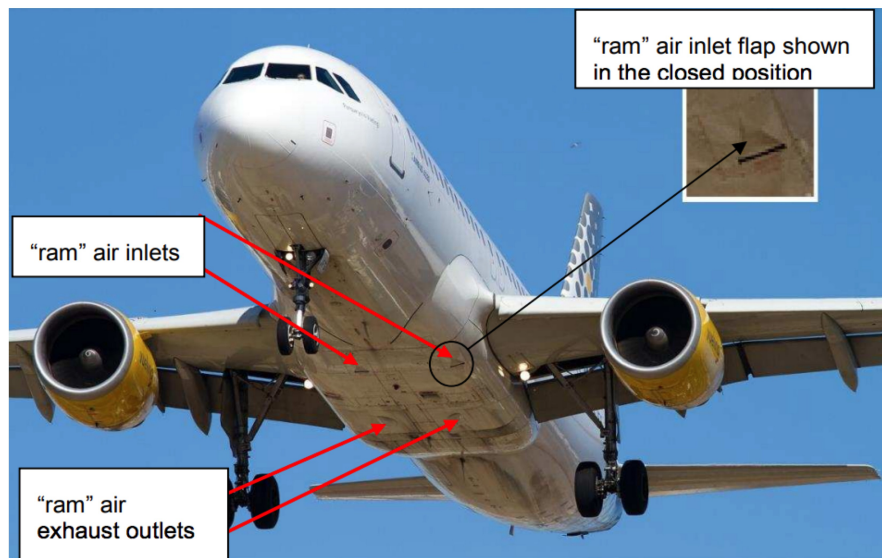
$$|q_C| = (1 - \beta)\dot{m}c_p(T_{3a} - T_4) = \dot{m}c_p(T_7 - T_{6a})$$

$$\epsilon_C = \frac{T_{3a} - T_4}{T_{3a} - T_{6a}}$$



SCAMBIATORI DI CALORE

Posizione delle prese dinamiche della ram air:



Fonte: [19]

Presenza dinamica: massima e minima apertura

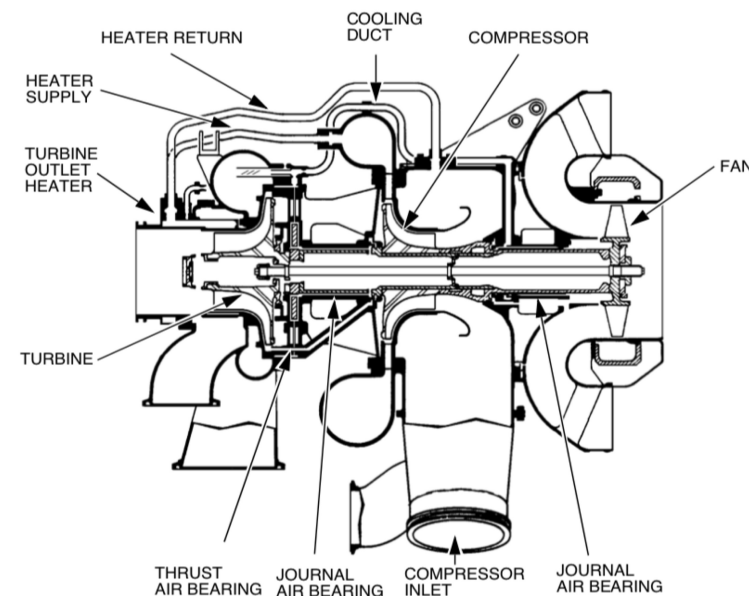


Fonte: [20]



Fonte: [20]

COMPRESSORE



Fonte: [2]

$$P_c = -\dot{m}'c_p(T_2 - T_1) \quad \text{dove} \quad \dot{m}' = \dot{m} - \dot{m}_{BPV} = (1 - \beta)\dot{m}$$

$$T_{2is} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 r_c^{\frac{k-1}{k}} \quad \eta_c = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{c_p(T_{2is} - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} = \frac{T_{2is} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\} = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[r_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\}$$

TURBINA

$$P_e = -c_p \dot{m}' (T_6 - T_5)$$

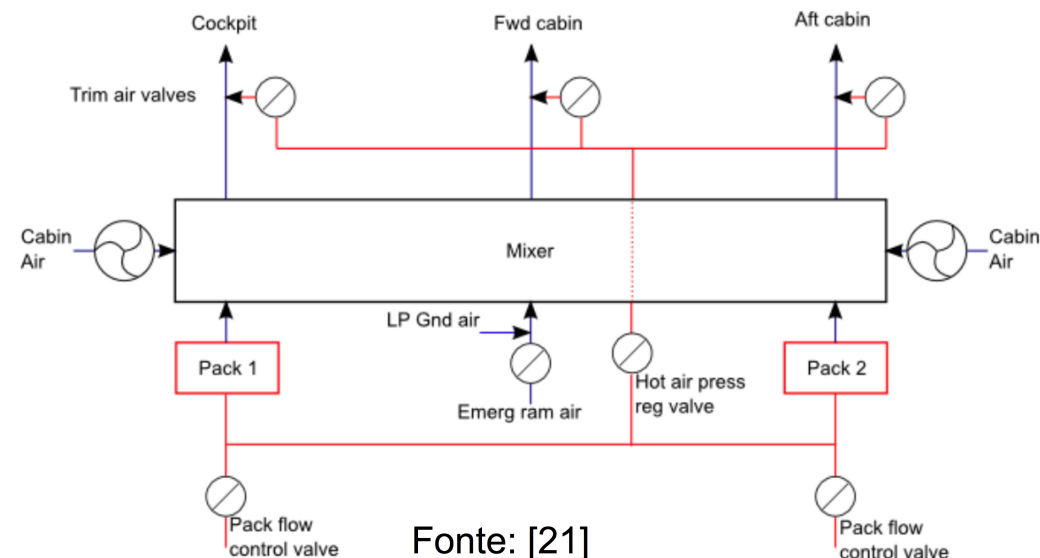
$$T_{6is} = T_5 \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_5 r_e^{\frac{1-k}{k}}$$

$$\eta_t = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_{6is}}$$

$$T_6 = T_5 \left[1 - \eta_t \left(1 - r_e^{\frac{1-k}{k}} \right) \right]$$

$$\dot{m}(1 - \beta)c_p(T_{6a} - T_6) + \dot{m}\beta c_p(T_{6a} - T_1) = 0$$

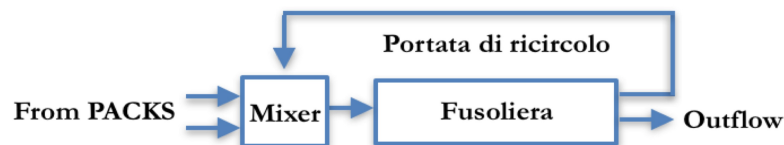
MIXER



Fonte: [21]

$$0 = \dot{m}_{tot}(1 - \alpha)c_p(T_i - T_7) + \dot{m}_{tot}\alpha c_p(T_i - T_{cab}) \quad T_7 = \frac{T_i - \alpha T_{cab}}{1 - \alpha}$$

FUSOLIERA



$$\dot{m}_{tot}c_p(T_{cab} - T_i) = q_{tot} \quad \longrightarrow \quad \dot{m}_{tot} = \frac{q_{tot}}{c_p(T_{cab} - T_i)} \quad \longrightarrow \quad \dot{m} = \frac{(1 - \alpha)\dot{m}_{tot}}{2}$$

Supponendo note le seguenti grandezze:

$$q_{tot}, T_{cab}, T_i, \alpha, \beta, \epsilon_{PHE}, \epsilon_{MHE}, \epsilon_C, \epsilon_R, T, r_c, r_e, \eta_c, \eta_t, T_{iMHE}$$

avremo per il flusso primario le seguenti incognite:

$$T_1, T_2, T_3, T_{3a}, T_4, T_5, T_6, T_{6a}, T_7, \dot{m}$$

mentre per il flusso secondario:

$$T_{iPHE}, T_{uPHE}, \dot{m}_s$$

Abbiamo in totale 13 incognite, riconducibili a 11 grazie alle formule sotto riportate

$$\dot{m} = \frac{(1 - \alpha)q_{tot}}{2c_p(T_{cab} - T_i)} \quad T_7 = \frac{T_i - \alpha T_{cab}}{1 - \alpha}$$

Il sistema **non lineare** di 11 equazioni in 11 incognite riportato nella sezione di destra deve essere risolto numericamente.

Viene utilizzata la funzione MatLab denominata *fsolve*

Nota: verrà effettuato controllo sulla portata minima in ingresso alla fusoliera (FAR 25.831) nonché comparazione dei risultati con i dati sperimentali [2].

$$1. \dot{m}(T - T_1) = \dot{m}_s(T_{uPHE} - T_{iPHE})$$

$$2. T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[r_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\}$$

$$3. \epsilon_{PHE} = \frac{T - T_1}{T - T_{iPHE}} \text{ oppure } \epsilon_{PHE} = \frac{T_{uPHE} - T_{iPHE}}{T - T_{iPHE}}$$

$$4. (1 - \beta)\dot{m}(T_2 - T_3) = \dot{m}_s(T_{iPHE} - T_{iMHE})$$

$$5. \epsilon_{MHE} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_{iMHE}} \text{ oppure } \epsilon_{MHE} = \frac{T_{uMHE} - T_{iMHE}}{T_2 - T_{iMHE}}$$

$$6. \epsilon_C = \frac{T_{3a} - T_4}{T_{3a} - T_{6a}}$$

$$7. \epsilon_R = \frac{T_3 - T_{3a}}{T_3 - T_4}$$

$$8. (1 - \beta)(T_{3a} - T_4) = (T_7 - T_{6a})$$

$$9. T_3 - T_{3a} = T_5 - T_4$$

$$10. T_{6a} = \beta T_1 + (1 - \beta)T_6$$

$$11. T_6 = T_5 \left[1 - \eta_t \left(1 - r_e^{\frac{1-k}{k}} \right) \right]$$

La prima condizione che verrà simulata è quella relativa ad una giornata particolarmente calda (50 °C) in cui il velivolo è al suolo.

INPUT

$$q_{tot} = 28500 \text{ W}$$

$$t_{cab} = 24^\circ\text{C}$$

$$t_i = 14^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0.35$$

$$\beta = 0$$

$$\epsilon_{PHE} = 0.85$$

$$\epsilon_{MHE} = 0.85$$

$$\epsilon_C = 0.2$$

$$\epsilon_R = 0.3$$

$$t = 205^\circ\text{C}$$

$$r_c = 1.35$$

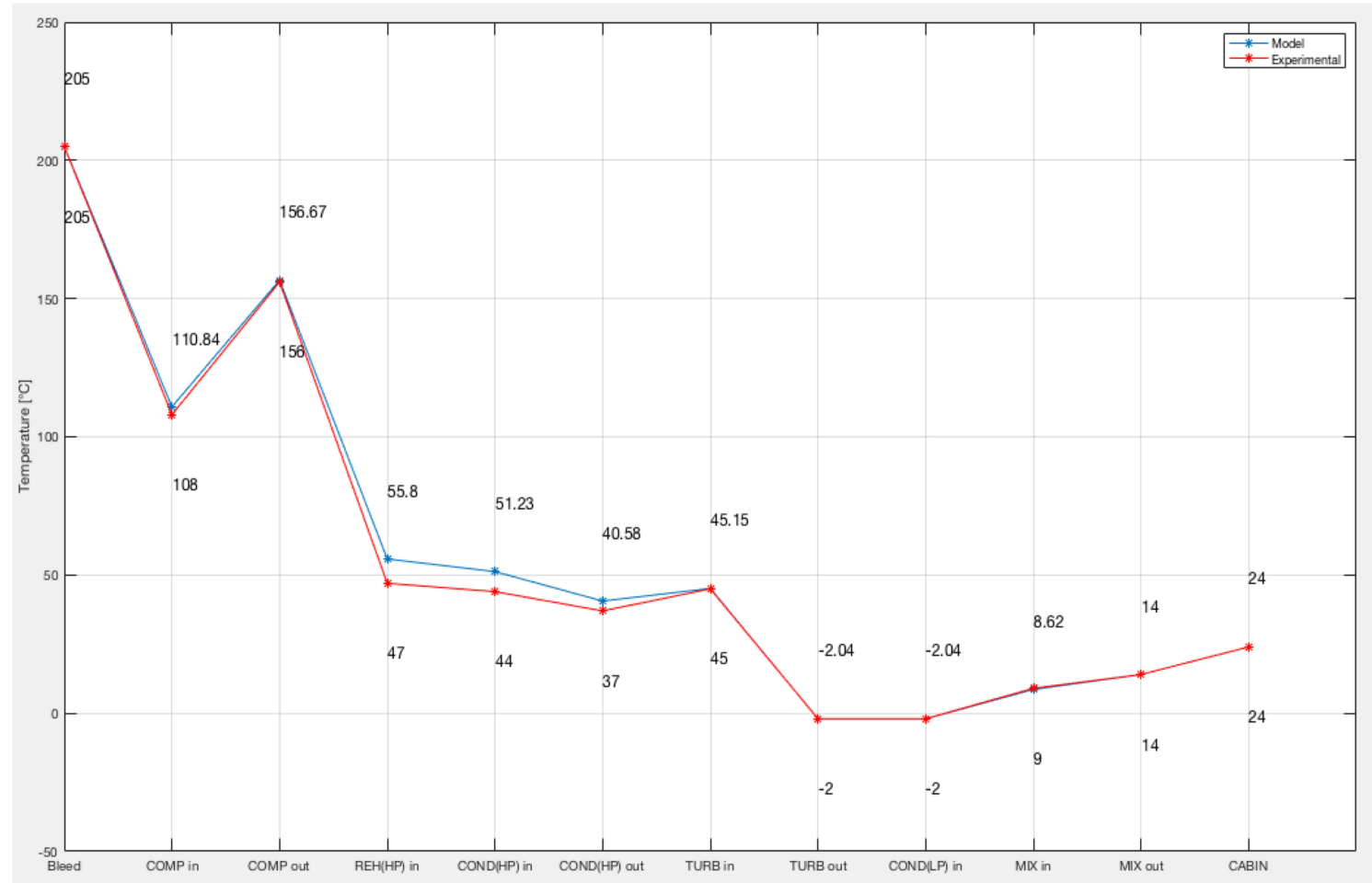
$$r_e = 2.3$$

$$\eta_c = 0.75$$

$$\eta_t = 0.7$$

$$T_{iMHE} = 38^\circ\text{C}$$

OUTPUT



$$\dot{m} = 0.9226 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_s = 1.6553 \text{ kg/s}$$

$$T_{iPHE} = 94.22^\circ\text{C}$$

$$T_{uPHE} = 146.7^\circ\text{C}$$

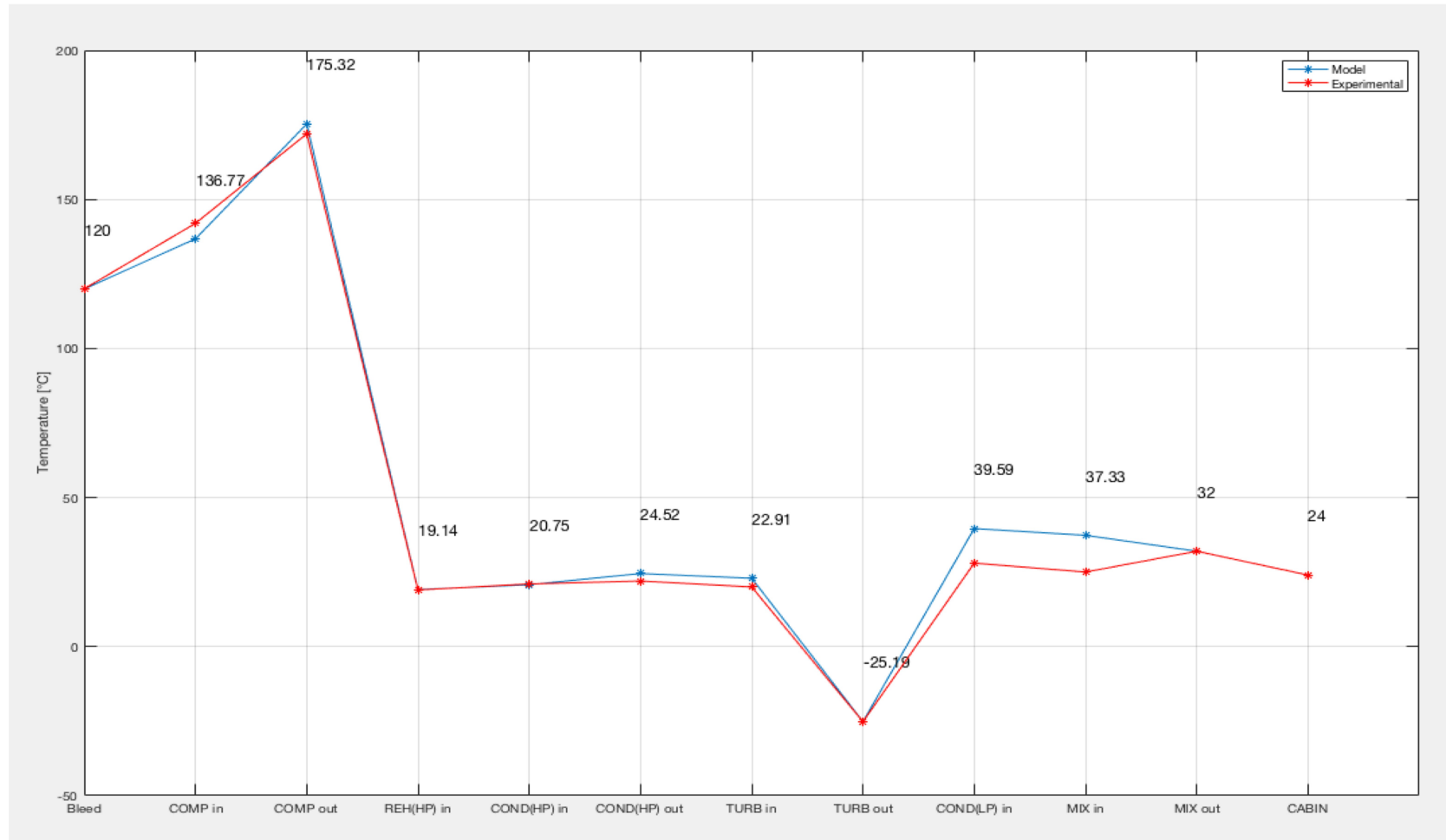
Nota: sopra sono riportati i risultati sperimentali, al di sotto quelli forniti dal costruttore [2].

La seconda simulazione riguarda una giornata particolarmente fredda (-23°C) e con il velivolo sempre a terra.

INPUT

- $q_{tot} = -8750\text{W}$
- $t_{cab} = 24^{\circ}\text{C}$
- $t_i = 32^{\circ}\text{C}$
- $\alpha = 0.4$
- $\beta = 0.4$
- $\epsilon_{PHE} = 0.9$
- $\epsilon_{MHE} = 0.9$
- $\epsilon_C = 0.2$
- $\epsilon_R = 0.3$
- $t = 120^{\circ}\text{C}$
- $r_c = 1.25$
- $r_e = 2.35$
- $\eta_c = 0.7$
- $\eta_t = 0.75$
- $T_{iMHE} = -23^{\circ}\text{C}$

OUTPUT

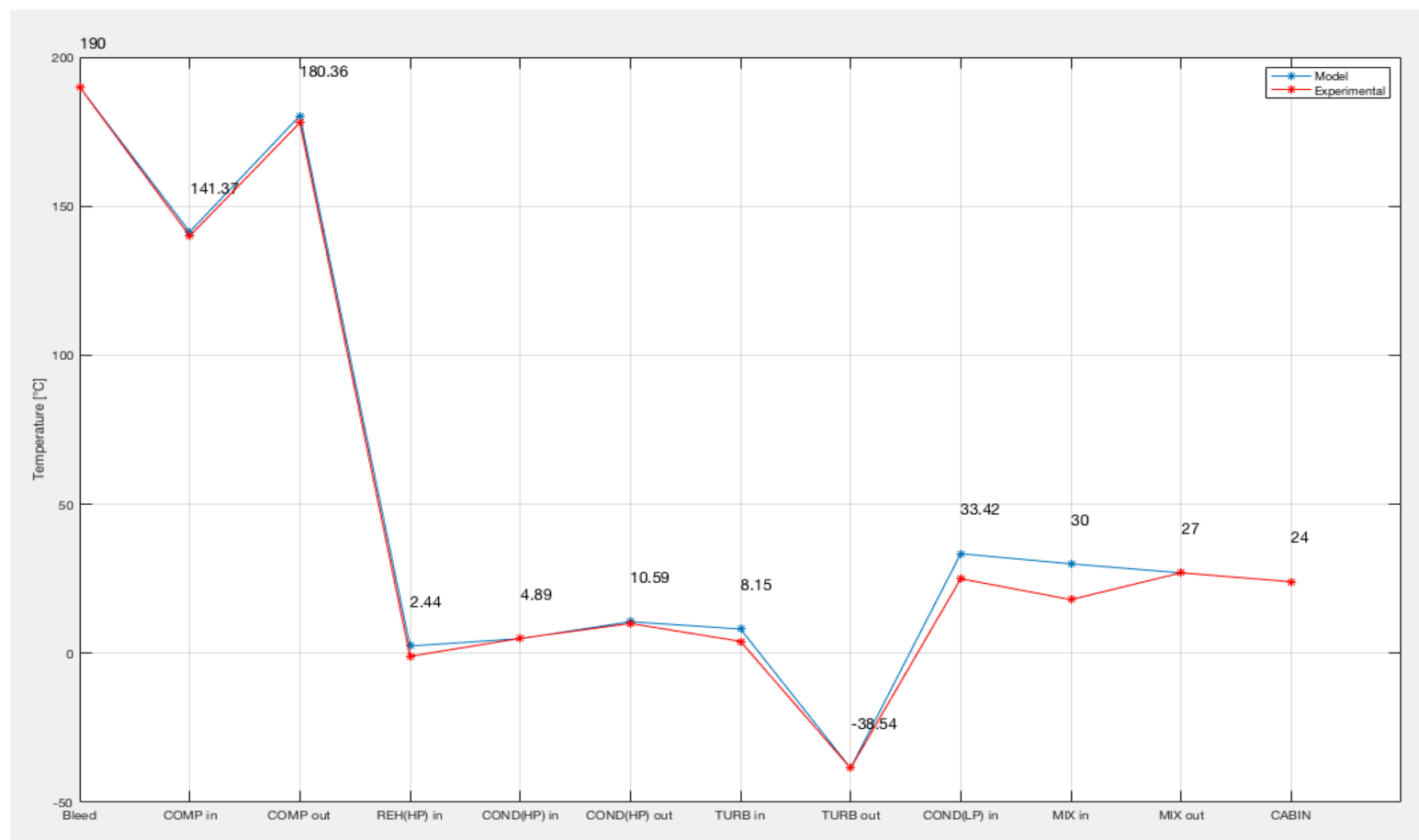


L'ultima simulazione fa riferimento alla condizione di volo alla quota di crociera di 25000 ft e giornata fredda, con temperatura esterna di -61°C .

INPUT

- $q_{tot} = -8750 \text{ W}$
- $t_{cab} = 24^{\circ}\text{C}$
- $t_i = 27^{\circ}\text{C}$
- $\alpha = 0.5$
- $\beta = 0.4$
- $\epsilon_{PHE} = 0.75$
- $\epsilon_{MHE} = 0.65$
- $\epsilon_C = 0.2$
- $\epsilon_R = 0.3$
- $t = 190^{\circ}\text{C}$
- $r_c = 1.25$
- $r_e = 2.4$
- $\eta_c = 0.7$
- $\eta_t = 0.75$
- $T_{iMHE} = -35^{\circ}\text{C}$

OUTPUT



CONCLUSIONI

- Il risultato finale è stato soddisfacente, tenendo conto del fatto che il modello si basa sulle relazioni dei gas ideali e trascura completamente l'umidità dell'aria, tenendo solo parzialmente conto delle perdite di carico.

SVILUPPI FUTURI

- Introduzione dell'influenza dell'umidità all'interno del modello
- I valori dell'efficienza degli scambiatori potranno essere stimati in maniera più accurata una volta nota la geometria degli stessi
- Una versione più accurata del modello richiederebbe inoltre la conoscenza delle caratteristiche funzionali di turbina e compressore per poter stimare in maniera opportuna i valori dei rendimenti isoentropici al variare del rapporto di compressione
- Sarebbe infine auspicabile conoscere più nel dettaglio le condizioni sperimentali con le quali sono state effettuate le misurazioni da parte del costruttore, rendendo quindi più veritieri i risultati forniti dal modello

- [1] Lezioni di Fisica Tecnica, Pierfrancesco Brunello, Edises 2022.
- [2] A319/A320/A321 Environmental Control System, Liebherr Aerospace Lindenberg.
- [3] Isidoro Martinez, “Aircraft Environmental Control”, 1995-2023
- [4] Single Aisle Technical Training Manual T2 (IAE V2500) (Lvl 2&3) Power Plant IAE V2500, Airbus
- [5] Airbus A320 Flight Crew Operating Manual: Pneumatic;
- [6] Airbus A320 FlightCrew Operating Manual: Air conditioning, pressurization, ventilation
- [7] M.Merzvinskas, “Air conditioning systems for aeronautical applications: a review”.The Aeronautical Journal, April 2020.
- [8] Planès, T.; Delbecq, S.; Pommier-Budinger, V.; Bénard, E. Modeling and Design Optimization of an Electric Environmental Control System for Commercial Passenger Aircraft. *Aerospace* 2023, 10, 260. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030260>.
- [9] Iaia Paolo Donato, Modellizzazione di un sistema ECS bleedless per velivoli da trasporto civile, Politecnico di Torino, 2019
- [10] Xiong Peng, “Aircraft Environmental Control System modeling for configuration selection”, Cranfield University, 2013.
- [11] Rolando Vega Diaz, “Analysis of an Electric Environmental Control System to reduce the energy consumption of fixed-wing and rotary-wing aircraft”, Cranfield University, 2011.
- [12] Pavol Pecho, Iveta Škvareková, Viliam Ažaltovič, Michal Hruz, Design of air circuit disinfection against COVID-19 in the conditions of airliners
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A320_family.
- [14] <https://www.npr.org/2014/01/11/261467270/mcdonnell-douglas-dc-9-flies-into-retirement>
- [15] <https://aviationweek.com/air-transport/end-era-lufthansa-retires-its-last-boeing-737>
- [16] http://www.british-caledonian.com/images/BCal%20A320%20Manual_0010%20copy.jpg
- [17] <https://www.aerocontact.com/en/virtual-aviation-exhibition/product/441-pratt-and-whitney-v2500-engine>
- [18] <https://i.stack.imgur.com/x6Udn.png>
- [19] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904918300477>
- [20] <https://www.facebook.com/watch/?v=1325084644279901>
- [21] <https://hursts.org.uk/airbus-technical/html/ar01s03.html>