

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale***  
***«Principi di funzionamento ed applicazioni***  
***dell' Auxiliary Power Unit (APU) nel settore***  
***aeronautico»***

Tutor universitario: Prof. Fabio Bignucolo

Laureando: *Daniele Biroccio*

Padova, 18/03/2024

# Auxiliary Power Unit

## Cos'è?

Si tratta di un'unità di potenza ausiliaria utile per l'alimentazione dei sistemi di bordo, soprattutto durante le cosiddette "Ground Operations", ed in casi più particolari durante le fasi di volo.

Si presenta come una turbina a gas, normalmente posizionata nella parte posteriore degli aerei di linea, nei pressi della coda, ove è osservabile il suo tubo di scarico.

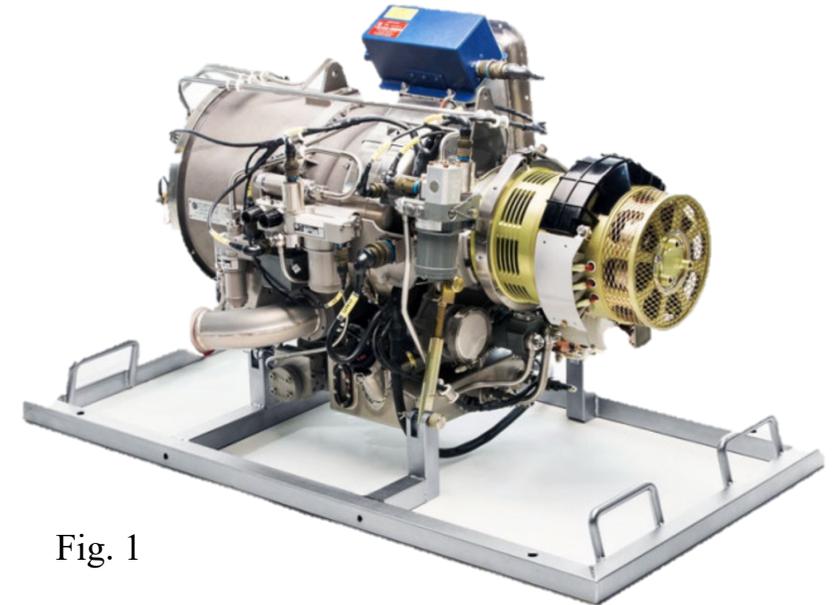


Fig. 1

- 1917

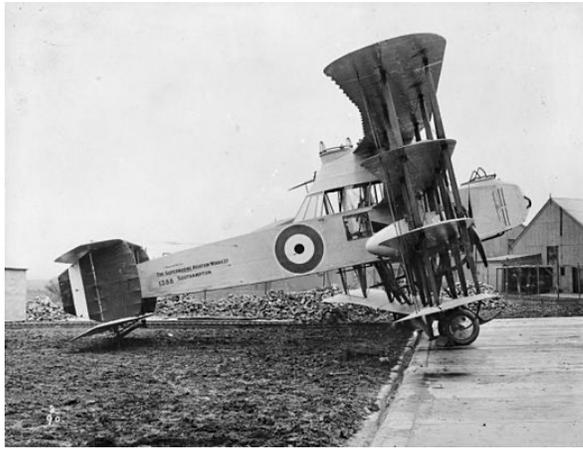


Fig. 2

*Pemberton-Billing P.B.31E*

- 1942



Fig. 3

*B-29 Superfortress*

- 1963



Fig. 4

*Boeing 727*

L'esigenza di poter dotare l'aeromobile di fonti di potenza elettrica ausiliaria, iniziò con lo svilupparsi dell'aviazione stessa; di fatti troviamo i primi prototipi di APU già nella seconda metà degli anni '10 del 1900. Successivamente, nel corso del tempo, si intuì la necessità di dover garantire agli aeromobili autonomia dal punto di vista del proprio sostentamento energetico. Occorre aspettare il B727 per poter menzionare il primo gas-turbine APU, presentato nel 1963.

# Ciclo Brayton-Joule

Dal punto di vista operativo, la tipologia di Auxiliary Power Unit che viene normalmente utilizzata nel settore aeronautico è quella del motore turbogas, il quale si basa a livello teorico sul ciclo termodinamico noto come Brayton-Joule.

Facendo riferimento allo schema impiantistico di fig. 5, si può constatare come qualsiasi macchina operante tramite ciclo turbogas è composta, quantomeno nella sua versione più elementare, da un compressore, una camera di combustione interna ed una turbina.

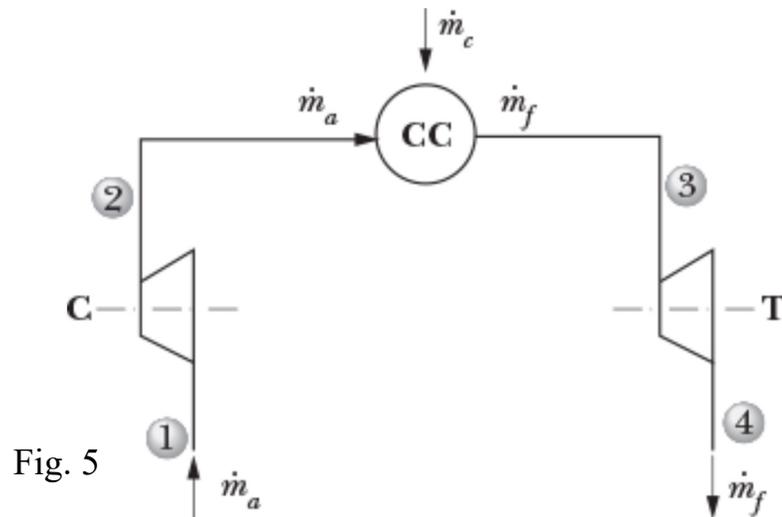


Fig. 5

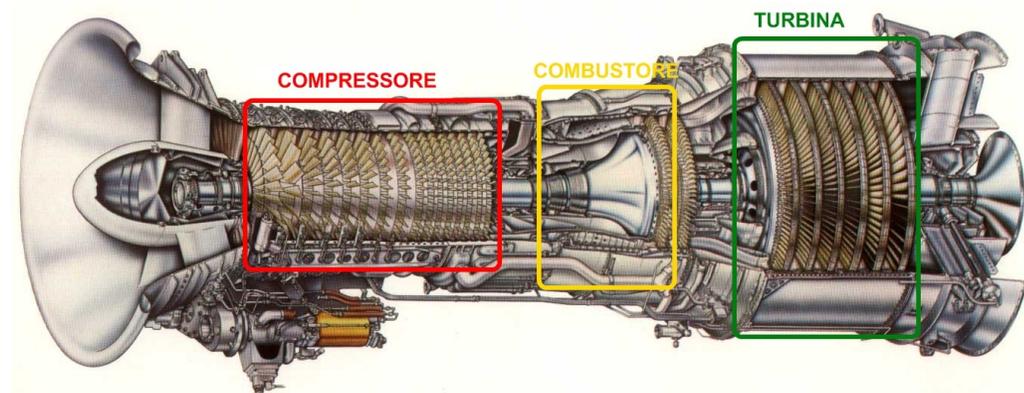


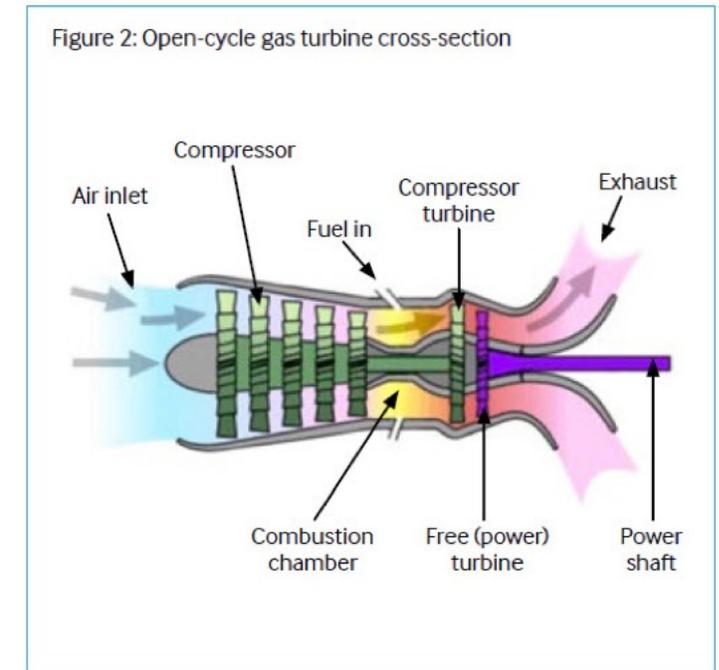
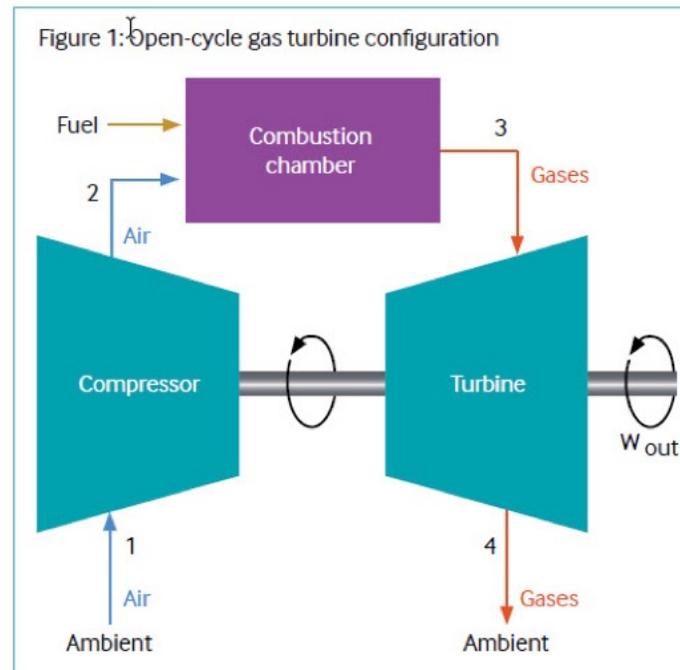
Fig. 6

General Electric LM2500 Gas Turbine

## Ciclo turbogas di un' unità Auxiliary Power Unit

- 1-2 Compressione reale in turbocompressore
- 2-3 Combustione isobara
- 3-4 Espansione reale in turboespansore
- 4-1 Rilascio in atmosfera

Fig. 7



## Brayton-Joule ideale

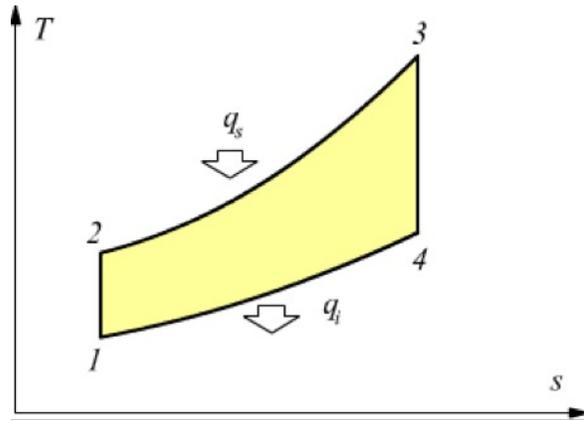


Fig. 8

## Brayton-Joule reale

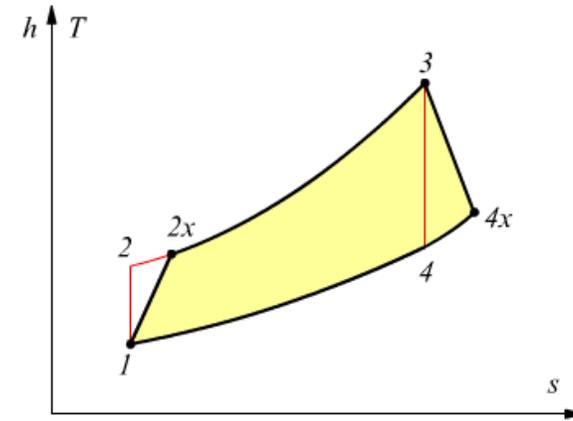


Fig. 9

**Differenza di incremento della temperatura nella fase di compressione nei due casi**

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

$$T_{2R} = T_1 + \frac{(T_{2i} - T_1)}{\eta_{i,c}}$$

## Componenti principali:

- Compressore
- Turbina
- Camera di combustione
- Gearbox

## Sistemi secondari:

- Sistema avviamento ed accensione
- Sistema di lubrificazione e raffreddamento interno
- Sistema di rilevamento ed estinzione incendio
- Impianto ventilazione
- Altri

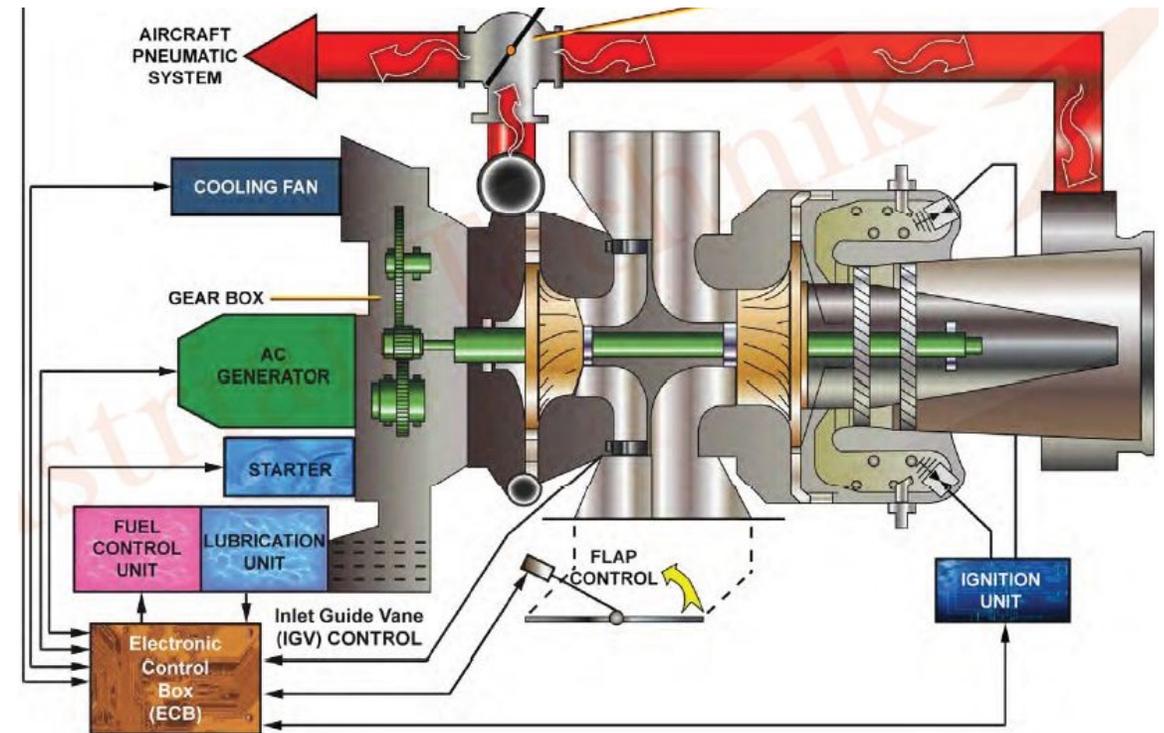


Fig. 10

## Perché l' Auxiliary Power Unit venne implementata?

L'esigenza di equipaggiare l'aeromobile con un'unità di potenza ausiliaria nasce dalla necessità di risolvere problematiche di natura sia operativa che economica. Nel passato infatti, le compagnie aeree erano costrette a dover utilizzare servizi di alimentazione di potenza elettrica, mediante le Ground Power Unit.

L'implementazione dell'APU permise al B727 di essere meno dipendente da quest'ultime, e di poter operare in ogni tipologia di scalo, anche in quelli sprovvisti di servizi di approvvigionamento energetico.



Fig. 11

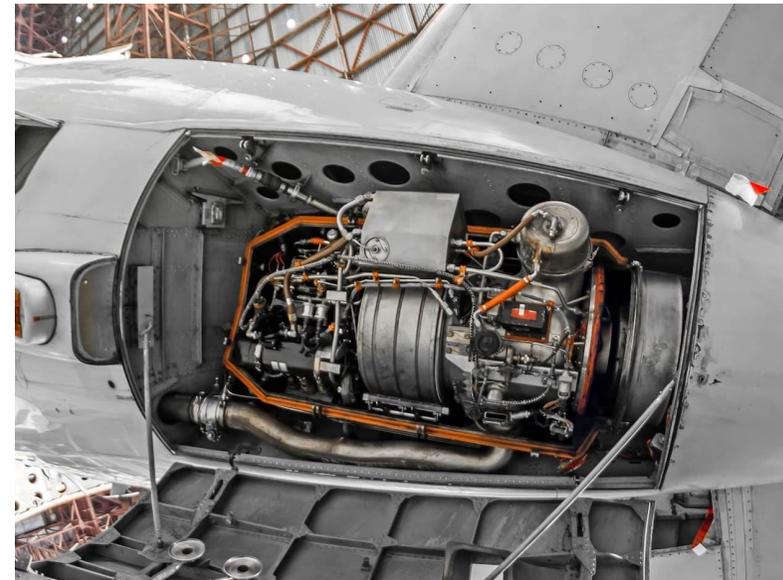


Fig. 12

# Vari servizi aeroportuali



Fig. 13

Ground Power Unit



Fig. 14

Preconditioned air  
Supply



Fig. 15

Rifornimento  
carburante

# Fasi operative dell'APU



# Ground Operations

Quando l'aeromobile si trova sul suolo, l'APU può essere utilizzato per le seguenti motivazioni:

1. Fornire energia elettrica per riscaldare/raffreddare la cabina passeggeri
2. Alimentare i sistemi di bordo durante le fasi di taxing (Se PushBack)
3. Fornire energia elettrica e pneumatica al fine di consentire l'accensione dei motori

N.B. Alcuni aeroporti limitano l'utilizzo dell'APU per motivi di inquinamento atmosferico e luminoso attorno l'area aeroportuale → GPU

# In-Flight Operations

Quando l'aeromobile si trova in volo, l'APU può essere utilizzato per le seguenti motivazioni:

1. Garantire la massima spinta durante fasi critiche in cui è richiesta la massima potenza ai motori
2. Fornire potenza elettrica in caso di emergenza al fine di alimentare la strumentazione di bordo
3. Tentare di riaccendere un motore soggetto ad avaria

## Componenti maggiormente soggetti ad avaria

Nel caso dell’Auxiliary Power Unit, come tutti i sottosistemi presenti nell’aeromobile, il suo monitoraggio è di vitale importanza, ed una sua eventuale avaria comprometterebbe l’“aeronavigabilità” dell’aeroplano.

Ciò avviene perché, statistiche alla mano, più del 50% delle volte in cui l’APU è soggetto ad avarie di varia natura, è necessaria la sostituzione dell’intera unità.

Nella seguente tabella raffigurante i componenti più colpiti, a livello statistico, da malfunzionamento, con a fianco il grafico relativo al numero di avarie riscontrate negli anni.

Component	No. of Failures	%
Turbine	165	41%
Gearbox	88	22%
Compressor	41	10%
Bearing	39	10%
Carbon Seal	31	8%
Combustor	14	3%
Others	29	7%
<b>Total</b>	<b>407</b>	<b>100%</b>

Fig. 16

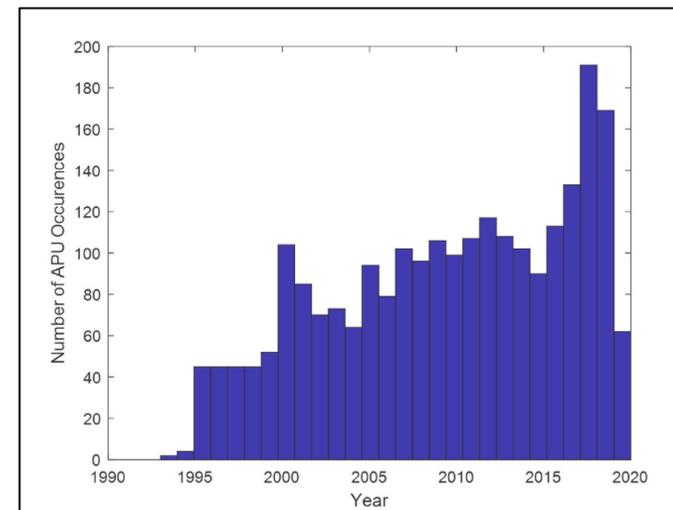


Fig. 17

## «Causa-Conseguenze» più comuni nei fenomeni di avaria

- Presenza di fumo nel “Bleed System” ➡ Fenomeni di spegnimento non richiesti
- Distribuzione irregolare del carburante dall’ugello ➡ Usura del disco della turbina
- Rottura del condotto di scarico ➡ Gravi rischi di integrità strutturale dell’aeromobile
- Grippaggio del rotore ➡ Interruzione temporanea della rotazione dell’albero rotore
- Malfunzionamento sezioni rotanti ➡ Alta temperatura del gas di scarico, alto consumo di olio e bassa efficienza di produzione di potenza elettrica in uscita
- Danno da oggetti esterni/cedimento dei cuscinetti. ➡ Sostituzione delle pale della turbina a causa dell’usura

## Costi della manutenzione

La manutenzione delle unità APU ha un costo che non può essere sottovalutato da compagnie aeree aventi flotte molto numerose, e ciò comporta quindi lo sviluppo di tecniche di manutenzione preventiva. Vi sono più fattori che sommandosi fanno lievitare considerevolmente la spesa totale:

1. Il costo della manutenzione “non pianificata”
2. I costi relativi ai materiali di ricambio
3. Costi relativi ai ritardi generati

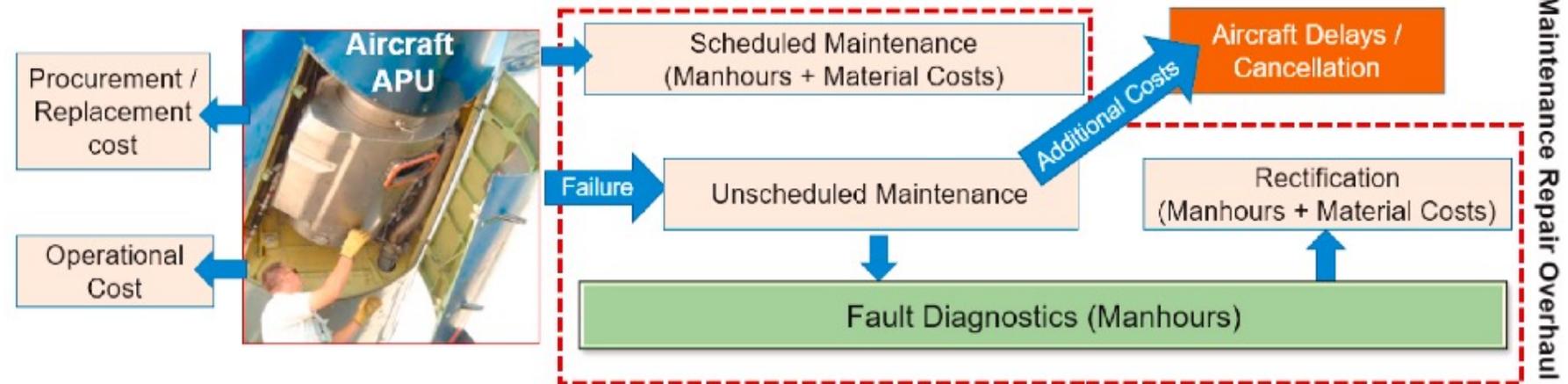
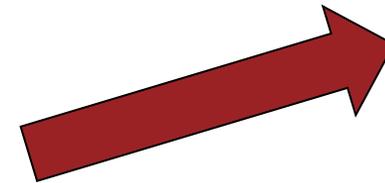


Fig. 18

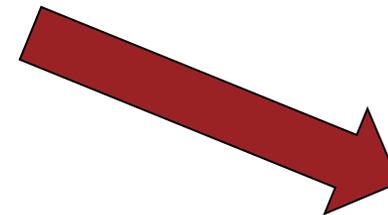
## APU Predictive Maintenance

Nel corso degli ultimi anni sono oggetto di studio varie tipologie di manutenzione preventiva, le quali hanno lo scopo di stimare le condizioni dei singoli componenti/materiali, al fine di poter permettere accurati e precisi interventi per evitare che l'APU abbia malfunzionamenti imprevisti.

Tra le varie tipologie in studio vi sono



**Sensori vibroacustici**



**Stime di "Virtual age"**

# Sensori vibroacustici

Tale metodologia consiste nell'introdurre dei sensori acustici non "invasivi", i quali operano analizzando le frequenze di oscillazione acustica generata dalla rotazione delle parti meccaniche dell'APU. Nel momento in cui durante la fase operativa vi sia una frequenza anomala, i sensori captano tale anomalia segnalando ad ingegneri e tecnici di intervenire per un possibile preludio di avaria del sistema.

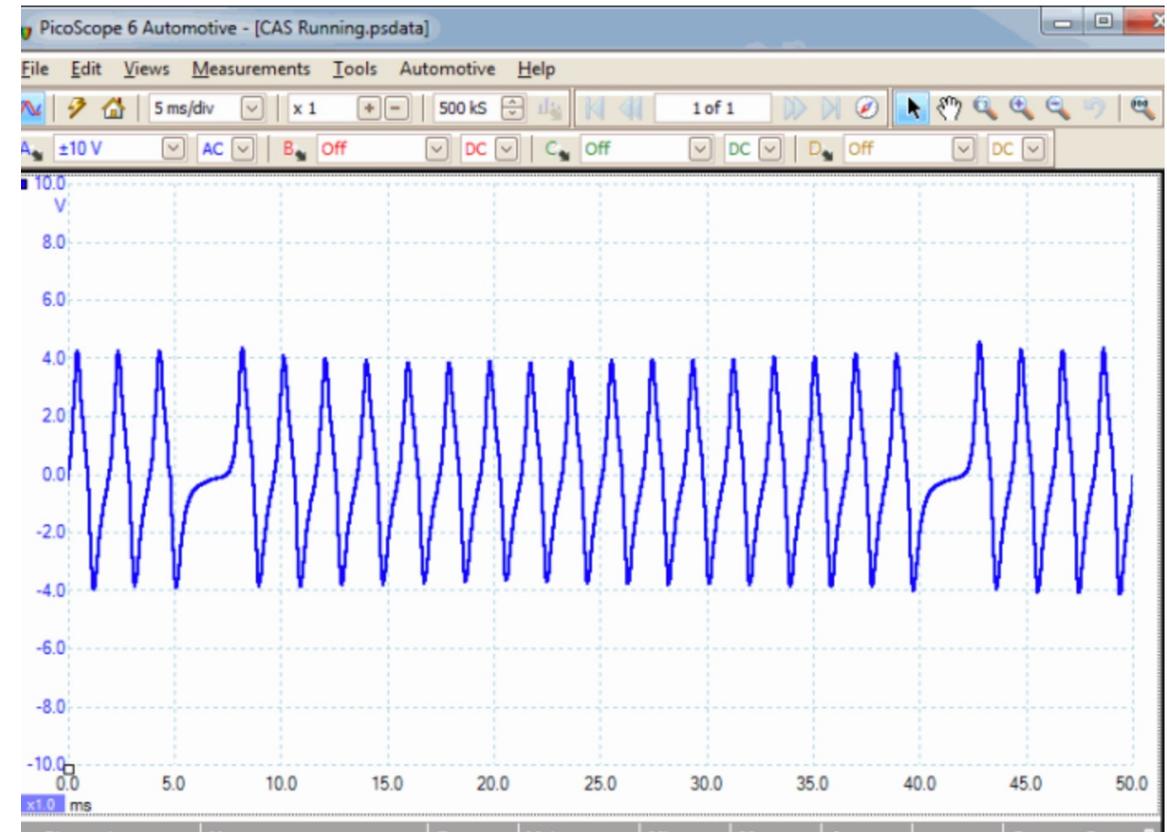


Fig. 19

# Stime di “Virtual age”

Consiste nello stimare la “vita virtuale” di ciascun componente, mediante un modello matematico che tiene conto di ogni qualvolta venga effettuata una riparazione, e la “soppesa” mediante un coefficiente compreso tra 0 ed 1, in base alla gravità dell’intervento.

Ciò consente di avere prontezza, seppur in maniera approssimativa, dello stato di salute delle unità APU, basandosi non più sulle effettive ore operative, ma tenendo conto anche dei vari malfunzionamenti e/o avarie, che hanno richiesto degli interventi di correzione.

Di seguito si riporta, a titolo puramente illustrativo, un esempio di stima di virtual age, noto come “Kijima model II”.

$$v_0 = 0,$$

$$v_1 = q_1 x_1, \text{ after the first repair,}$$

$$v_2 = q_2(v_1 + x_2), \text{ after the second repair, ...}$$

$$v_j = q_j(v_{j-1} + x_j), \text{ after the } j\text{th repair,}$$

$$v_n = q_n(v_{n-1} + x_n), \text{ after the } n\text{th repair.}$$

Si prevede che entro la fine del 2024 i passeggeri imbarcati in voli di linea supereranno i 4,35 Miliardi e, secondo le stime, tale cifra tenderà a raddoppiare entro il 2035. Tuttavia non bisogna trascurare l'impatto ambientale, che ad oggi rappresenta circa il 2% delle totali emissioni globali; occorre quindi fare in modo che tale sviluppo avvenga nel modo più sostenibile possibile.



***Grazie per l'attenzione!***

- APU History ([https://en.wikipedia.org/wiki/Auxiliary\\_power\\_unit](https://en.wikipedia.org/wiki/Auxiliary_power_unit))
- Ciclo termodinamico Brayton-Joule, Testo «Lezioni di Fisica Tecnica - Prof. Pierfrancesco Brunello
- Impianto A.P.U., Prof Giorgio Giorgi, Dispense del corso »Impianti di Bordo«, Università la Sapienza ([http://dma.ing.uniroma1.it/users/impbordo\\_c1/1300%20APU%202007ppf.pdf](http://dma.ing.uniroma1.it/users/impbordo_c1/1300%20APU%202007ppf.pdf))
- Auxiliary Power Unit – System Essentials - M. Hovanec , P. Korba , P. Šváb, S. Makó and M. Golisová, Technical University of Kosice/Faculty of Aeronautics, Kosice, Slovakia ([https://www.researchgate.net/publication/336728549\\_Auxiliary\\_Power\\_Unit\\_-\\_System\\_Essentials](https://www.researchgate.net/publication/336728549_Auxiliary_Power_Unit_-_System_Essentials))
- An Optional APU for Passenger Aircraft, Dieter Scholz Hamburg University of Applied Sciences, (<https://www.semanticscholar.org/paper/An-Optional-APU-for-Passenger-Aircraft-Scholz/c85ed4d72a9c101ee0a2d0894e1666ecf1ec7eb4>)

- Gas Turbine APU Reliability Modeling and Failure Forecasting, Peng Wang - Shaonian Wang - Lulu Wang  
([https://www.researchgate.net/publication/306033538\\_Gas\\_turbine\\_APU\\_reliability\\_modeling\\_and\\_failure\\_forecasting](https://www.researchgate.net/publication/306033538_Gas_turbine_APU_reliability_modeling_and_failure_forecasting))
- A review of aircraft auxiliary power unit faults, diagnostics and acoustic measurements, Cranfield University  
([https://www.researchgate.net/publication/352151830\\_A\\_review\\_of\\_aircraft\\_auxiliary\\_power\\_unit\\_faults\\_diagnostics\\_and\\_acoustic\\_measurements](https://www.researchgate.net/publication/352151830_A_review_of_aircraft_auxiliary_power_unit_faults_diagnostics_and_acoustic_measurements))