

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Stato dell'arte sull'utilizzo di
idrogeno come combustibile nei
motori turbogetto e turbofan»***

Tutor universitario: Prof. Ernesto Benini

Laureando: *Davide Depieri*

Matricola: 1218701

Padova, 15/06/2022

Decarbonizzazione del settore dei trasporti aerei

Combustione pulita dell'idrogeno

Modifiche da implementare e aspetti negativi

Simulazioni e calcoli effettuati allo stato dell'arte

Problemi di gestione delle alte temperature

Emissioni di NO_x

Scelta dei materiali



Bilancio di combustione

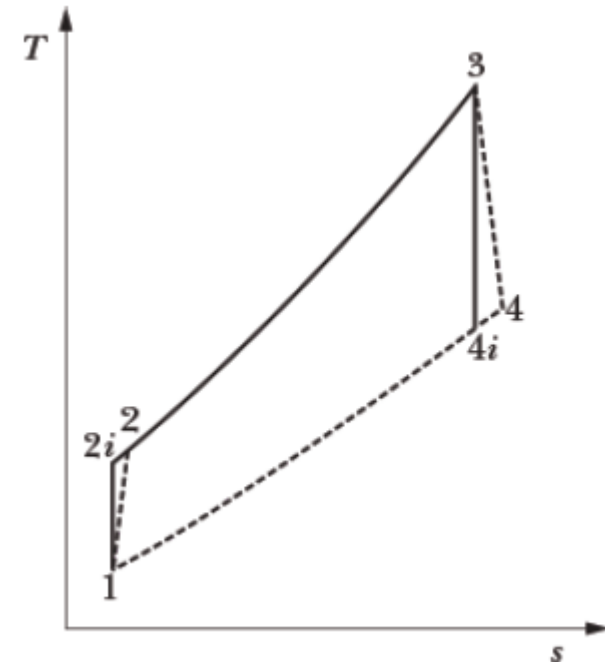
$$\dot{m}_a h_{t2} + \dot{m}_f LHV \eta_b = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_{t3} = \dot{m}_a (1 + f) h_{t3}$$

- \dot{m}_a : portata d'aria in camera di combustione
- \dot{m}_f : portata di combustibile
- $f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}$: rapporto combustibile-aria

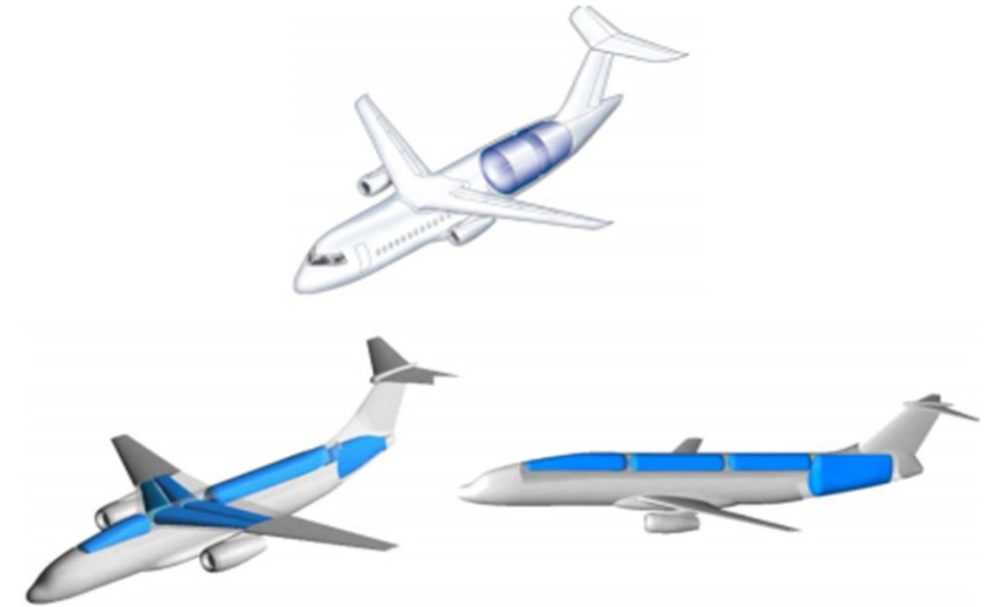
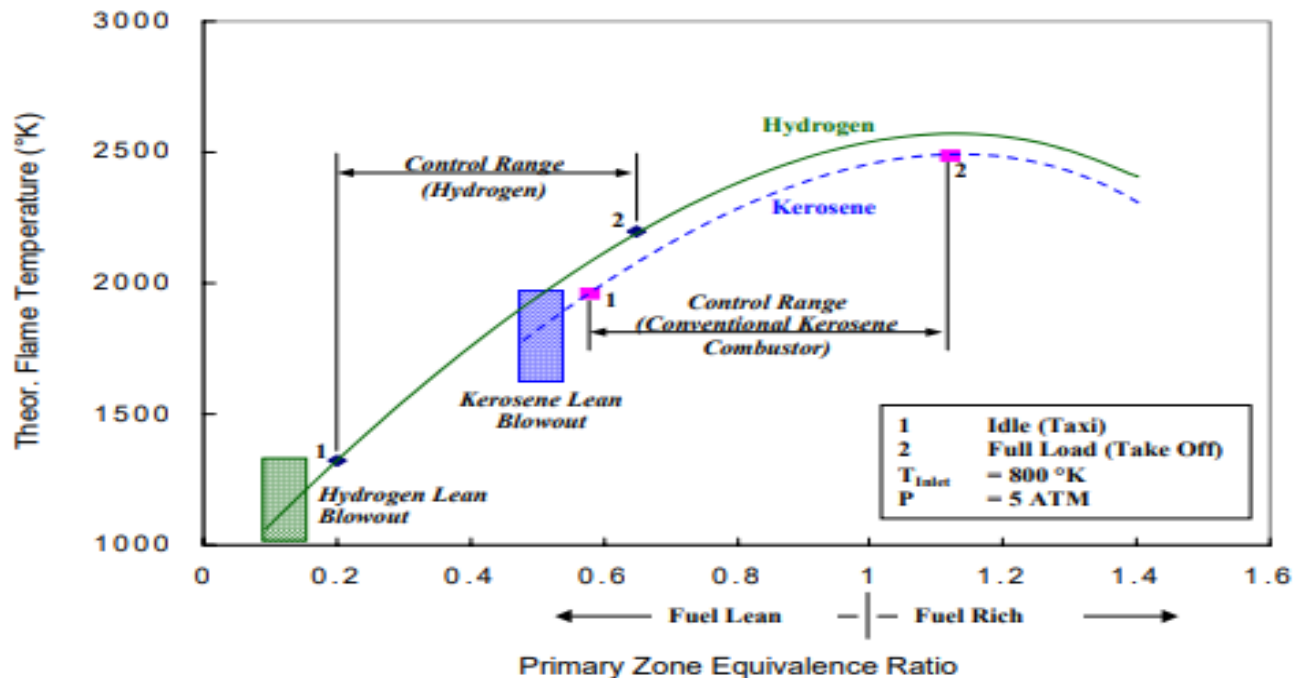
Bilanciare il prodotto di portata di combustibile e potere calorifico

Riduzione dei consumi specifici

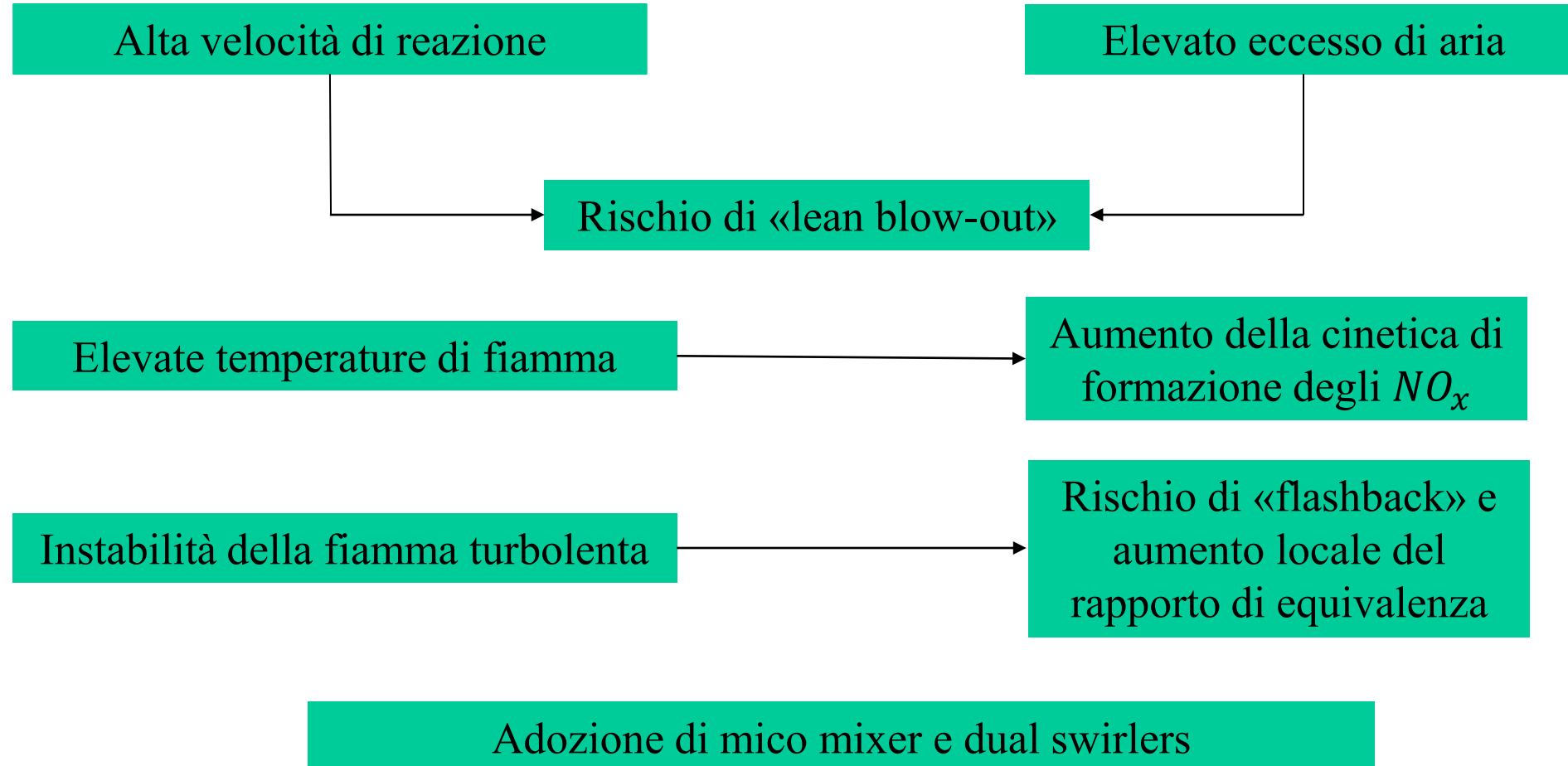
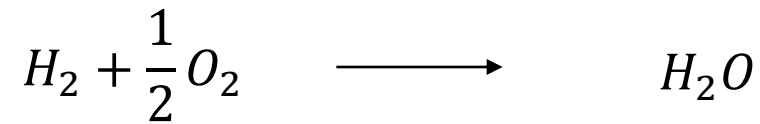
Eccesso di aria



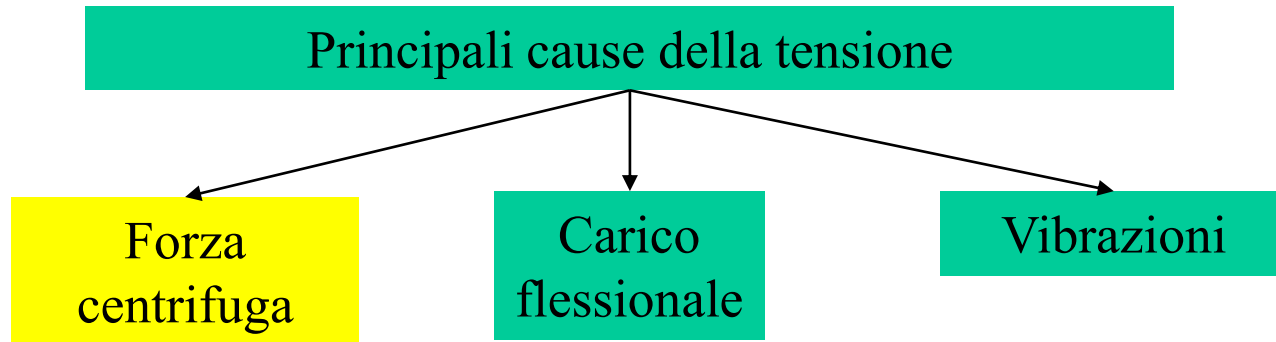
Proprietà	Idrogeno H_2	Kerosene $C_{12}H_{23}$
Potere calorifico inferiore [kJ/kg]	120000	43000
Densità [kg/m^3]	70,98 (LH_2)	780-810
Costo [\$/kg]	4,94	0,49



- Potere calorifico molto elevato
- Densità molto bassa
- Necessità di serbatoi adeguati
- Costo elevato e produzioni ridotte
- Sostenibilità ambientale

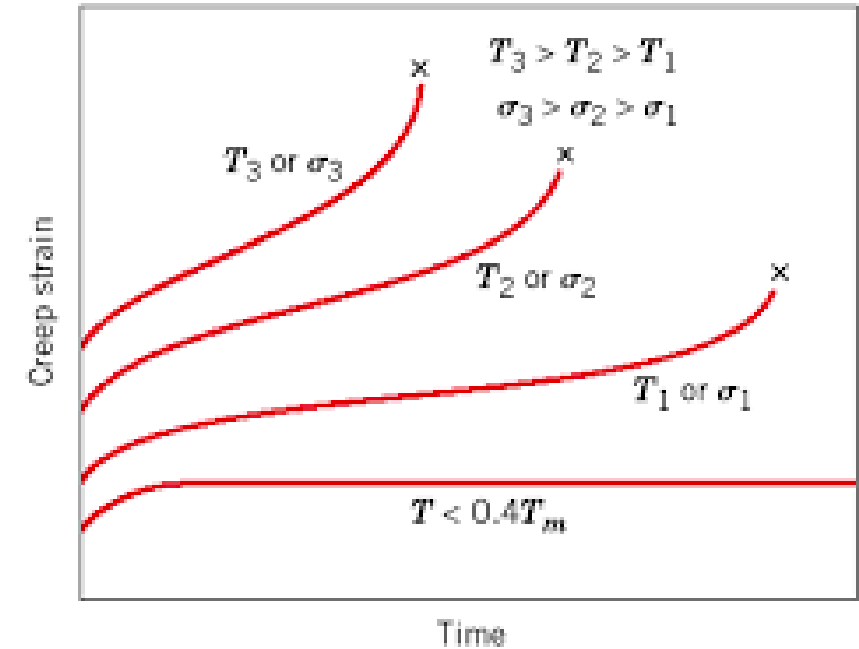


Creep: deformazione plastica dovuta a stress meccanico continuo, accentuato ad alte temperature



$$\frac{\sigma_c}{\rho_m} = \frac{U_t^2}{2} (1 - \nu^2)$$

- σ_c : tensione alla radice della pala
- ρ_m : densità del materiale
- U_t : velocità periferica al tip palare
- $\nu = \frac{D_h}{D_t}$: rapporto tra i diametri al hub e al tip



Modello monodimensionale di pala raffreddata

Ipotesi:

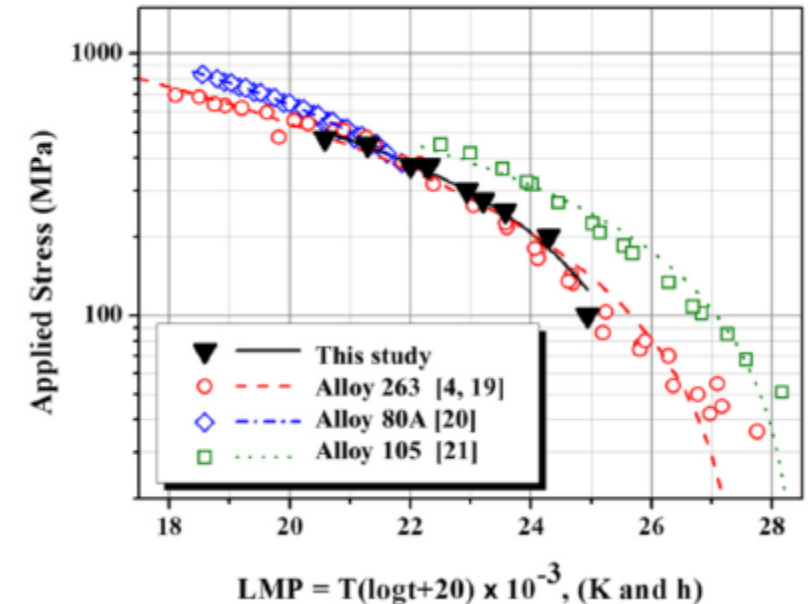
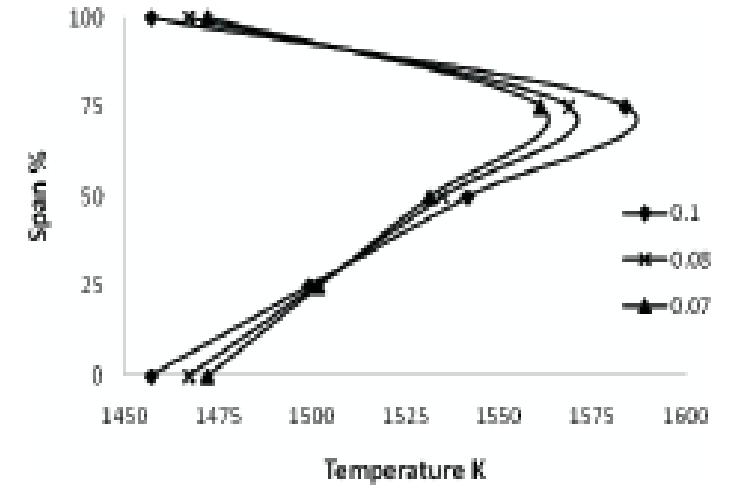
- La massima temperatura del gas T_{max} si ottiene al 75% dell'altezza palare a causa della rotazione delle pale che sposta il picco massimo rispetto al mid-span
- Temperatura del coolant T_c costante lungo la pala

$$T_{max} = T_{in} + (\Delta T_{combustor} \times RTDF)$$

$$T_m = T_g - \varepsilon(T_g - T_c)$$

$$LMP = T_m(\log t_f + C)$$

- T_m : temperatura della pala
- T_{in} : temperatura del gas in ingresso in turbina (da ciclo termodinamico)
- t_f : vita della pala in ore
- $RTDF$: fattore di distribuzione radiale di temperatura
- $\Delta T_{combustor}$: salto di temperatura in camera di combustione
- ε : efficacia del sistema di raffreddamento



Turbofan TF33 (Pratt&Whitney)

Dati generali:

- $n = 10000 \text{ rpm}$
- $D_h = 0,63 \text{ m}$
- $D_t = 0,759 \text{ m}$
- Inconel 740 ($C = 19,392$)
- $\rho_m = 8010 \text{ kg/m}^3$
- $RTDF = 0,1$
- $\varepsilon = 0,45$
- $\sigma_c = 197,8 \text{ MPa}$
- $LMP = 23300$

Risultati del ciclo alimentato a kerosene:

- $T_{in} = 1114 \text{ K}$
- $\Delta T_{combustor} = 461,4 \text{ K}$

Risultati del ciclo alimentato a idrogeno:

- $T_{in} = 1098,42 \text{ K}$
- $\Delta T_{combustor} = 445,82 \text{ K}$



Idrogeno		
$T_c [K]$	$T_m [K]$	$t_f [h]$
672,6	931,32	422915
692,6	940,32	243668
712,6	949,32	141867

kerosene		
$T_c [K]$	$T_m [K]$	$t_f [h]$
672,6	940,75	237395
692,6	949,75	138283
712,6	958,75	81372

Turbofan GE-90 (General Electric)

Dati generali:

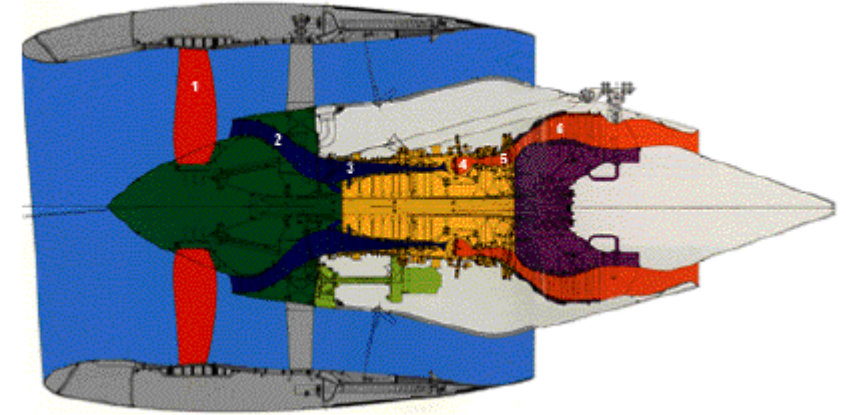
- $n = 10000 \text{ rpm}$
- $D_h = 0,63 \text{ m}$
- $D_t = 0,759 \text{ m}$
- Nimonic 105 ($C = 20$)
- $\rho_m = 8010 \text{ kg/m}^3$
- $RTDF = 0,1$
- $\varepsilon = 0,65$
- $\sigma_c = 197,8 \text{ MPa}$
- $LMP = 25600$

Risultati del ciclo alimentato a kerosene:

- $T_{in} = 1380,7 \text{ K}$
- $\Delta T_{combustor} = 585,24 \text{ K}$

Risultati del ciclo alimentato a idrogeno:

- $T_{in} = 1487,52 \text{ K}$
- $\Delta T_{combustor} = 692,06 \text{ K}$



www.dii.unipd.it

Idrogeno		
$T_c [K]$	$T_m [K]$	$t_f [h]$
815,46	1074,9	6548
835,46	1087,9	3400
855,46	1100,9	1793

kerosene		
$T_c [K]$	$T_m [K]$	$t_f [h]$
815,46	1033,53	58813
835,46	1046,53	28959
855,46	1059,53	14509

Rolls Royce a 3 linee d'albero

Dati generali:

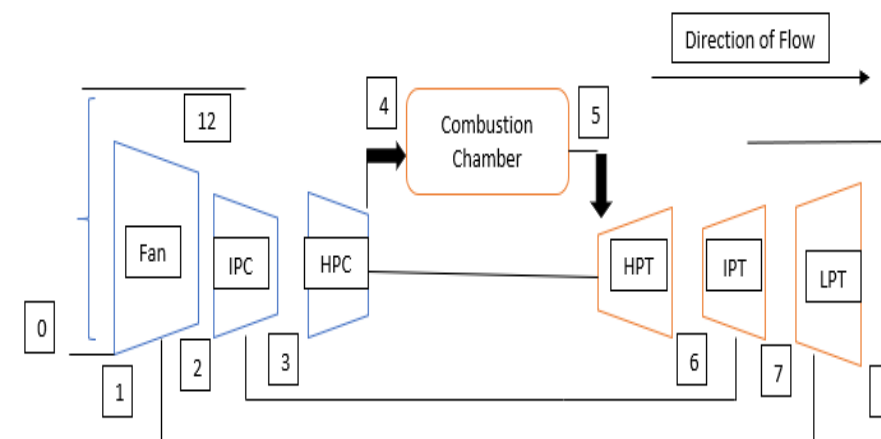
- $n = 10000 \text{ rpm}$
- $D_h = 0,63 \text{ m}$
- $D_t = 0,759 \text{ m}$
- Nimonic 105 ($C = 20$)
- $\rho_m = 8010 \text{ kg/m}^3$
- $RTDF = 0,1$
- $\varepsilon = 0,65$
- $\sigma_c = 197,8 \text{ MPa}$
- $LMP = 25600$

Risultati del ciclo alimentato a kerosene:

- $T_{in} = 1398,15 \text{ K}$
- $\Delta T_{combustor} = 591,4 \text{ K}$

Risultati del ciclo alimentato a idrogeno:

- $T_{in} = 1392,15 \text{ K}$
- $\Delta T_{combustor} = 585,4 \text{ K}$



www.dii.unipd.it

Idrogeno		
$T_c [K]$	$T_m [K]$	$t_f [h]$
826,8	1045	31449
846,8	1058	15725
866,8	1071	7996

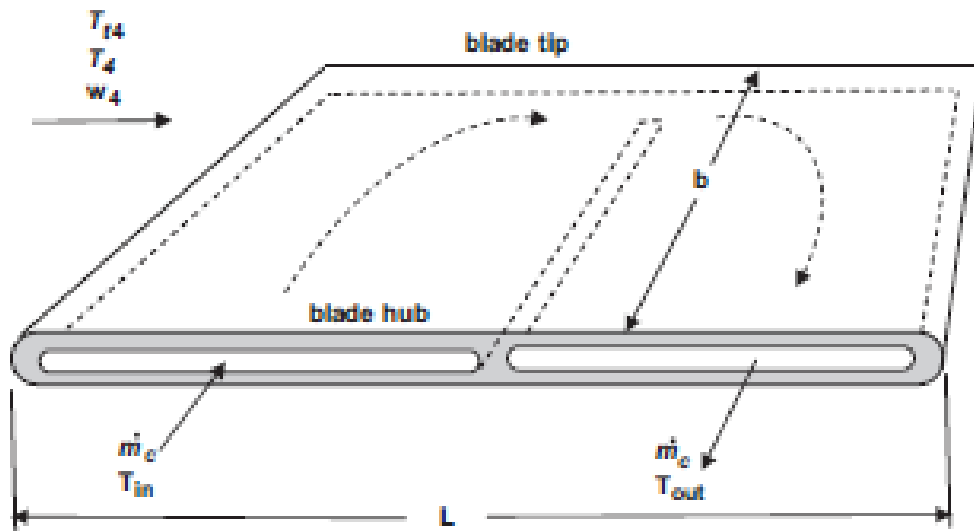
kerosene		
$T_c [K]$	$T_m [K]$	$t_f [h]$
826,8	1047,5	27487
846,8	1060,5	13789
866,8	1073,5	7034

Modelli più accurati si basano su correlazioni che descrivono lo scambio convettivo tra il gas di scarico e l'aria di raffreddamento lungo la pala

Richiedono la conoscenza di:

Proprietà dei gas al variare della temperatura

Geometrie delle pale

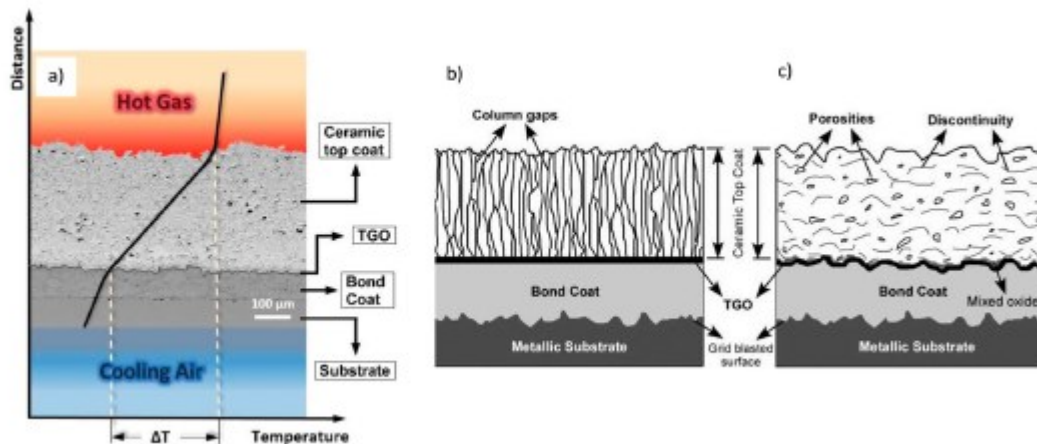


Aumento della quantità di vapore tra i prodotti di combustione

Modifica del coefficiente di scambio termico

Utilizzare superleghe di nickel, più resistenti alla corrosione e all'ossidazione

Implementare TBC con coefficienti di espansione termica più adeguati rispetto al substrato



Adottare inserti ceramici per i componenti maggiormente esposti alle alte temperature

Vantaggi

- Zero emissioni di anidride carbonica
- Riduzione dei consumi specifici
- Rinnovabilità della risorsa
- Corrosione ridotta

Svantaggi

- Costo
- Stoccaggio
- Elevate temperature di fiamma
- Aumento del contenuto di vapore
- Diverse modifiche da effettuare ai motori aeronautici
- Infragilimento da idrogeno
- Atmosfera duale

1. Thermodynamic Performance and Creep Life Assessment Comparing Hydrogen- and Jet-Fueled Turbofan Aero Engine, <https://doi.org/10.3390/app11093873>
2. Numerical analysis of a gas turbine combustor fueled by hydrogen in comparison with jet-A fuel, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.071>
3. Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121686>
4. Simulation and technical-economic-environmental optimization of the General Electric GE90 hydrogen turbofan engine, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.182>
5. Materials challenges in hydrogen-fuelled gas turbines, <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1981706>
6. Investigation into the Effects of Operating Conditions and Design Parameters on the Creep Life of High Pressure Turbine Blades in a Stationary Gas Turbine Engine; Mechanics and Mechanical Engineering Vol. 15, No. 3 (2011) 237–247
7. Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery; S. L. Dixon, B.Eng., Ph.D. Senior Fellow at the University of Liverpool.
8. Research and Development of Heat-Resistant Materials for Advanced USC Power Plants with Steam Temperatures of 700°C and Above; National Institute for Material Science, Tsukubaka, Japan.
9. Correlation Between Microstructure Evolution and Creep of Alloy 263; <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109847>
10. An overview on dry low NOx micromix combustor development for hydrogen-rich gas turbine applications; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.161>