

Macchine a fluido: la ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF)

Antonio Andreini, Andrea Arnone, Tommaso Bacci, Francesco Balduzzi, Maurizio De Lucia, Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Michele Marconcini, Roberto Pacciani, Alessio Picchi, Lorenzo Pinelli, Francesco Poli, Francesco Taddei, Luca Romani

Questa sezione illustra le attività di ricerca e sviluppo condotte da quattro gruppi del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF):

- TGroup: metodologie avanzate per l'analisi e la progettazione delle turbomacchine
- HTGroup: supporto allo sviluppo tecnologico delle turbine a gas
- AeroacousticGroup: studi e ricerche nel campo dell'aeroacustica
- ARES Group: sviluppo numerico e sperimentale dei motori a combustione interna

Questi gruppi vantano una consolidata tradizione di collaborazione con realtà industriali sia nazionali sia internazionali, contribuendo in modo significativo all'innovazione in diversi ambiti, dalla progettazione delle turbomacchine fino ai motori a combustione interna.

TGROUP – Metodologie avanzate per lo studio ed il progetto delle turbomacchine¹

I primi studi teorici del gruppo di ricerca iniziarono nel 1984-85 sul tema del “flutter” dei profili aerodinamici. Sebbene questa fosse un'importante tematica nella progett-

¹ Questo paragrafo è stato scritto da Andrea Arnone, Roberto Pacciani, Michele Marconcini, Lorenzo Pinelli e Francesco Poli.

Antonio Andreini, University of Florence, Italy, antonio.andreini@unifi.it, 0000-0002-7508-9607
Andrea Arnone, University of Florence, Italy, andrea.arnone@unifi.it, 0000-0001-7471-4442
Tommaso Bacci, University of Florence, Italy, tommaso.bacci@unifi.it, 0000-0002-9890-3528
Francesco Balduzzi, University of Florence, Italy, francesco.balduzzi@unifi.it, 0000-0003-3333-945X
Maurizio De Lucia, University of Florence, Italy, maurizio.delucia@unifi.it, 0000-0003-2000-1927
Bruno Facchini, University of Florence, Italy, bruno.facchini@unifi.it, 0000-0003-4489-4256
Giovanni Ferrara, University of Florence, Italy, giovanni.ferrara@unifi.it, 0009-0004-8713-1958
Michele Marconcini, University of Florence, Italy, michele.marconcini@unifi.it, 0000-0002-4391-0093
Roberto Pacciani, University of Florence, Italy, roberto.pacciani@unifi.it, 0000-0002-7242-0480
Alessio Picchi, University of Florence, Italy, alessio.picchi@unifi.it, 0000-0003-4389-4537
Lorenzo Pinelli, University of Florence, Italy, lorenzo.pinelli@unifi.it, 0000-0002-0457-4218
Francesco Poli, University of Florence, Italy, francesco.poli@unifi.it, 0000-0001-6620-0791
Francesco Taddei, University of Florence, Italy, francesco.taddei@unifi.it, 0000-0001-6341-6490
Luca Romani, University of Florence, Italy, luca.romani@unifi.it, 0000-0002-9482-7804

Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Antonio Andreini, Andrea Arnone, Tommaso Bacci, Francesco Balduzzi, Maurizio De Lucia, Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Michele Marconcini, Roberto Pacciani, Alessio Picchi, Lorenzo Pinelli, Francesco Poli, Francesco Taddei, Luca Romani, *Macchine a fluido: la ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF)*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4.22, in Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Rocco Furferi (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 1. Ingegneria Industriale*, pp. 151-161, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0972-4, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4

tazione delle turbomacchine, rappresentava al tempo uno strumento complementare e scarsamente generalizzabile. L'obiettivo di ricerca si spostò quindi su metodologie di studio che fossero in linea con le tendenze dei centri di ricerca all'avanguardia nel campo dell'aerodinamica. Nel 1987 iniziò l'attività di ricerca relativa allo sviluppo del codice TRAF (TRANsonic Flow solver), uno strumento di Fluidodinamica Computazionale (CFD) capace di simulare il flusso all'interno di una turbomacchina. Al tempo molti erano gli sviluppi della CFD ma prevalentemente in ambito aerospaziale. L'obiettivo della ricerca e del codice TRAF fu quindi di utilizzare le migliori tecniche di calcolo per lo studio e la progettazione avanzata delle turbomacchine. In questa prima fase si inseriscono le numerose collaborazioni con l'Institute for Computer Applications in Science and Engineering (ICASE, NASA Langley Research Center, VA, USA) e l'Institute for Computational Mechanics in Propulsion (ICOMP, NASA Lewis Research Center, Cleveland, OH, USA).

Successivamente, anche Nuovo Pignone, Fiat Avio, von Kármán Institute e Ansaldo Energia iniziarono ad utilizzare i codici TRAF finanziando attività di ricerca sulla progettazione aerodinamica di turbomacchine. Questo consentì al TGroup di poter portare avanti lo sviluppo delle tecniche CFD implementate nel codice TRAF contando sul supporto finanziario e un diretto utilizzo ed interesse da parte dell'industria. Un percorso che ha anticipato quello che oggi è il trasferimento tecnologico.

Gli anni a venire hanno rappresentato un periodo di florido sviluppo dei metodi CFD e hanno visto l'Università di Firenze sempre in prima linea fra gli attori internazionali ed in particolar modo nei progetti della EU.

Alla aerodinamica si sono aggiunti temi importanti nella progettazione dei propulsori aeronautici come l'aeromeccanica e la previsione del rumore. Di rilievo la collaborazione con Avio sulle pompe criogeniche del lanciatore europeo ARIANE 5. Ad oggi e dopo 40 anni le collaborazioni con le Industrie che inizialmente si sono interessate al TRAF sono sempre attive. Gli obiettivi sono ovviamente più ambiziosi ma la Scuola di Firenze resta comunque un riferimento nel panorama internazionale. Da menzionare tre aspetti di rilievo. Il primo è che l'esperienza decennale nel campo dell'aerodinamica e dell'aeromeccanica ha consentito al TGroup di restare all'avanguardia in un settore, come quello delle macchine a fluido, che oggi si è rivelato strategico nell'ambito della transizione energetica. Il secondo è l'affezione alla fluidodinamica computazionale che si manifesta attraverso i costanti sviluppi della modellistica della turbolenza fino all'utilizzo dell'intelligenza artificiale e del machine learning come supporto allo sviluppo di modelli data-driven. Il terzo è legato alla stretta e duratura collaborazione con le industrie e si è concretizzato in un approccio allo sviluppo della ricerca sempre focalizzato sulla fruibilità dei metodi per la fase di progettazione. Una ricerca quindi con tempi di ricaduta molto rapidi e compatibili con le necessità aziendali.

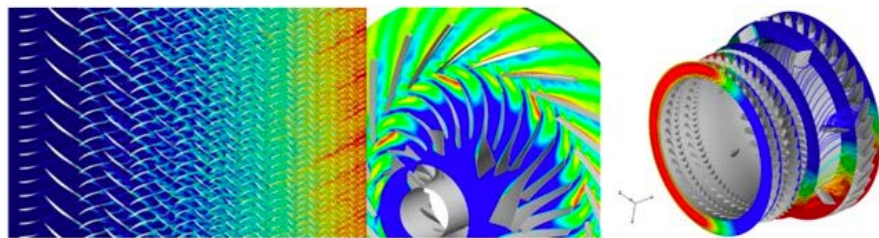


Figura 102 – Applicazioni della fluidodinamica computazionale a moduli di turbomacchine (a) compressore assiale con 11 stadi (b) stadio di turbocompressore per sovralimentazione (c) turbina a gas in condizioni di parzializzazione del combustore.

HTGROUP – Il sostegno allo sviluppo tecnologico delle turbine a gas²

La storia di questa avventura, come è ben delineato nella sezione storica di questa edizione, inizia ormai oltre 30 anni fa e si sviluppa progressivamente con forti legami e connessioni col contesto industriale nazionale ed internazionale e con un contributo sempre crescente alla ricerca competitiva in ambito europeo. Negli ultimi 10 anni l'acquisizione del sito di Calenzano e lo sviluppo del THT-LAB, Laboratory of Technologies for High Temperature, nelle sue funzioni di diagnostica sperimentale e calcolo numerico ad alte prestazioni, rappresenta un indubbio passo in avanti, portando ulteriori possibilità alle principali realtà industriali del settore.

La collaborazione col territorio è stata particolarmente di rilievo con la società Nuovo Pignone, la più importante realtà industriale del distretto fiorentino, diventata negli ultimi trent'anni un riferimento nel settore dell'energia, fino ad essere oggi un asset determinante della multinazionale Baker Hughes (BH), per le turbomacchine e le turbine a gas.

Sicuramente il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) e in particolare il gruppo di ricerca sullo scambio termico e la combustione ha giocato un ruolo da protagonista contribuendo in maniera significativa al progresso dell'azienda in termini di innovazione tecnologica e ciò ha permesso alla realtà industriale una crescita significativa, giocando un ruolo sempre più orientato alla riduzione delle emissioni inquinanti nel settore power generation, fino alla transizione energetica con un progressivo abbandono dell'uso delle risorse fossili.

Lo sviluppo del THT Lab ha portato lo studio sperimentale ad elevata maturità tecnologica (Technology Readiness Level -TRL 5-6) con la possibilità di sperimentare componenti e moduli di turbina a gas fino a condizioni di temperature e pressione reali (2000 °C e 10 bar), connessa alla simulazione numerica in grado di supportare in maniera adeguata la ricerca scientifica e lo sviluppo industriale, con oltre 1500 cpu cores e nodi GPUs in specifici cluster HPC.

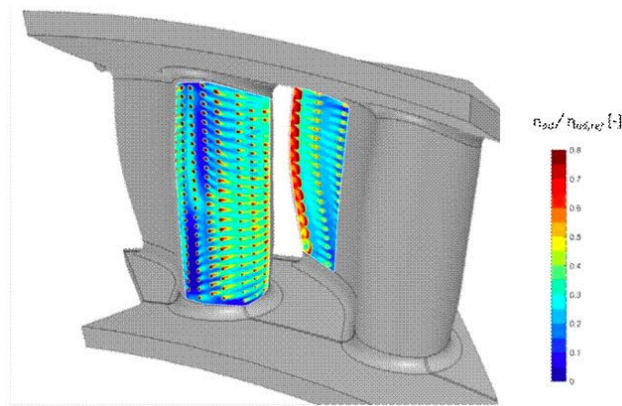


Figura 103 – Misura di efficacia di raffreddamento a film su statore raffreddato.

Lo sviluppo dei nuovi laboratori di Calenzano ha inoltre potenziato notevolmente la capacità di spesa del DIEF nei confronti dell'indotto territoriale della piccola industria

² Questo paragrafo è stato scritto da Bruno Facchini, Antonio Andreini, Alessio Picchi e Tommaso Bacci.

manifatturiera, la cui elevata professionalità ha permesso lo sviluppo di prototipi di elevata qualità tecnica, rendendo possibili ricerche sperimentali e validazioni numeriche di valenza internazionale in ambito scientifico e di interesse diretto per lo sviluppo industriale.

Le tecniche di misura si sono evolute negli anni e ormai si possono applicare sui componenti di macchina «real hardware» come l'uso delle vernici sensibili alla concentrazione dell'ossigeno (Pressure Sensitive Paint) che consente la caratterizzazione dell'efficacia del raffreddamento a film sui profili palari raffreddati degli statori e dei rotor degli stadi ad alta temperatura. La Figura 103 mostra un risultato di questa tipologia ottenuto su un profilo statorico raffreddato di una macchina Baker Hughes (Babazzi et al. 2023).

La capacità sinergica offerta dal DIEF al contesto industriale ha contribuito a rendere Nuovo Pignone BH uno dei leader internazionali nello sviluppo di macchine sempre più efficienti ed affidabili orientate all'uso sempre più marcato delle tecniche di fabbricazione più innovative come l'Additive Manufacturing. In tale contesto risultano rilevanti i contributi in termini di design di geometrie innovative e di caratterizzazione sperimentale delle prestazioni termiche, anche dopo la loro implementazione in componenti reali raffreddati. La Figura 104 mostra un esempio di features innovative per sistemi di raffreddamento interni, preliminarmente caratterizzate a livello di geometria fondamentale (Castelli et al. 2024) successivamente implementate in uno statore raffreddato.

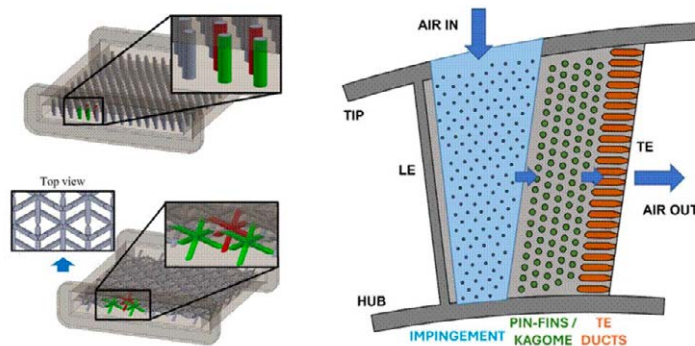


Figura 104 – Geometrie innovative per sistemi di raffreddamento interni.

La progettazione indipendente di nuove macchine richiede in quest'ambito una conoscenza approfondita dei circuiti dell'aria secondaria, il cui funzionamento è determinante per l'affidabilità della turbina. In questo contesto è stato sviluppato un prototipo semplificato di turbina, denominato *stator-rotor cavity rig* (Figura 105), per consentire uno studio dettagliato di fenomeni complessi ancora non del tutto investigati nel contesto della letteratura internazionale riguardanti l'ingestione di gas caldi all'interno degli spazi ruota.

La peculiarità di tale sperimentazione risiede nell'uso di tecniche di diagnostica non intrusiva in grado di fornire risultati in termini di distribuzioni spaziali e di cogliere l'evoluzione di strutture di flusso non stazionarie attraverso approcci *time resolved*.

La pubblicazione dei risultati ottenuti ha suscitato vasto interesse nel contesto internazionale proponendo sia una descrizione fenomenologica dei flussi secondari all'interno delle cavità statore-rotore, sia utili correlazioni progettuali per un impiego diretto nell'ottimizzazione della turbomacchina. Anche nel contesto dei progetti europei si riscontrano i segni evidenti di questa collaborazione, come ad esempio il pro-

getto TRANSITION (Horizon Europe), coordinato da DIEF a cui partecipa Nuovo Pignone BH, orientato allo sviluppo di tecnologie di combustione innovative per facilitare la successiva cattura e sequestrazione della CO_2 (Carbon Capture Storage) negli impianti combinati già in esercizio.

In Figura 106 sono riportate alcune immagini dei test sperimentali condotti presso il THT-Lab volti a determinare le soluzioni ottimali di bruciatori per l'esercizio con Exhaust Gas Recirculation (EGR) capaci di garantire alti tenori di CO_2 allo scarico favorendone la cattura e sequestrazione.

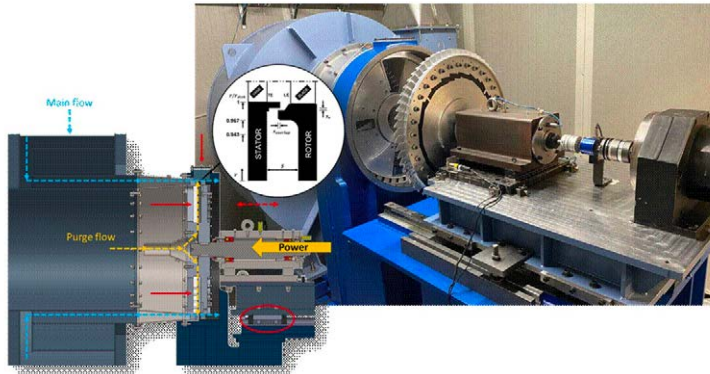


Figura 105 – Stator-Rotor Cavity rig presso il THT LAB del DIEF.

Le investigazioni sperimentali sono state supportate da un'estensiva campagna di simulazioni CFD di tipo high-fidelity (LES), validate sui dati sperimentali e capaci quindi di estendere il numero di configurazioni analizzate.

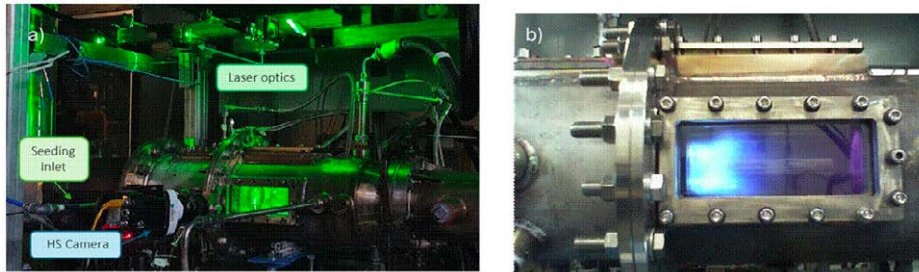


Figura 106 – Test di diagnostica ottica dei processi di combustione presso il THT LAB: a) setup per velocimetria laser PIV, b) visualizzazione di una fiamma turbolenta.

In Figura 107 sono riportati alcuni snapshots delle analisi del processo di spegnimento della fiamma in bruciatori operati ad alto tenore di EGR.

Anche nel campo dell'introduzione dell'idrogeno si ricordano il progetto MSCA-ETN INSPIRE (Horizon 2020), ancora coordinato da DIEF, incentrato sullo studio di combustori di tipo Pressure Gain, una innovativa soluzione per le future turbine a gas alimentate ad idrogeno, che troverà ulteriore sviluppo nel più recente MSCA-DN H2POWRD.

A titolo d'esempio si riporta in Figura 108 un esempio di simulazione di un combustore a detonazione rotante (RDC) nel quale è stato per la prima volta verificata la possibilità di un raffreddamento delle pareti della camera mediante *film cooling*.

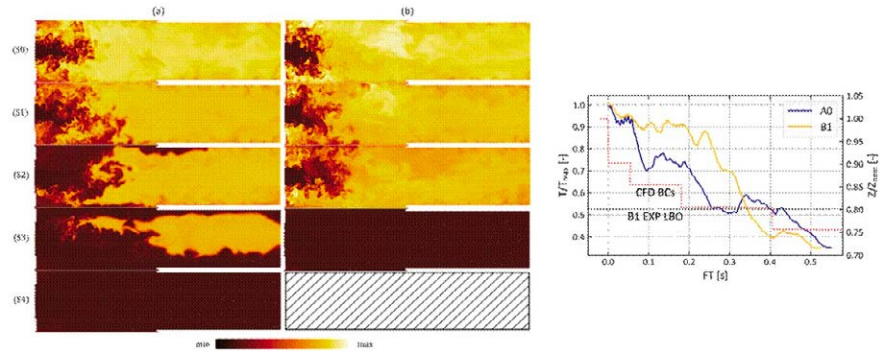


Figura 107 – Simulazioni del processo di Lean Blow Out (LBO) di due configurazioni di bruciatori operati ad alto tenore di EGR.

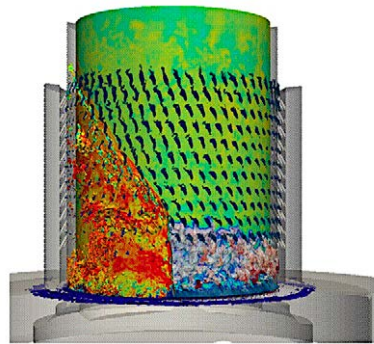


Figura 108 – Snapshot di una simulazione CFD high-fidelity del fronte di fiamma detonante in un combustore RDC (Rotating Detonation COmbustor) raffreddato mediante film cooling.

Da segnalare inoltre il progetto ICHArUS (MSCA-DN, Horizon Europe), dove si sta studiando per via numerica e sperimentale l'utilizzo di campi elettrici ed elettromagnetici per il controllo dei processi di combustione con lo scopo di rendere possibile l'uso di combustibili non convenzionali (idrogeno e ammoniaca) limitando la formazione di sostanze inquinanti e garantendo un'adeguata stabilità operativa. Infine, merita segnalare il progetto ACHIEVE, finanziato nell'ambito della JU Clean Hydrogen (Horizon Europe), volto allo studio dei processi di combustione nelle turbine a gas alimentate mediante miscele idrogeno-ammoniaca, soluzione di estremo interesse per il contesto industriale grazie alla facilità di stoccaggio e trasporto dell'ammoniaca rispetto all'idrogeno puro. Nello stesso contesto Clean Hydrogen si segnala il progetto INSIGH2T, ammesso al finanziamento e partito ad inizio 2025, che vede ancora una volta il DIEF consorziato con Nuovo Pignone BH e i più prestigiosi centri di ricerca europei per lo studio del processo di combustione di idrogeno nelle turbine a gas.

Di particolare rilievo sono le attività di ricerca nel contesto dello sviluppo di combustori a basse emissioni inquinanti per turbine a gas impiegate come motori aeronautici. Nel corso degli ultimi 20 anni si segnalano oltre 15 progetti di ricerca europei a cui il DIEF ha partecipato, spesso anche come capofila. Nel corso degli ultimi 5 anni risulta dominante l'attività di ricerca volta allo sviluppo di tecnologie e metodologie di indagine per il futuro impiego di idrogeno come combustibile carbon-free per l'aviazione civile. Si segnalano i progetti HESTIA (Horizon Europe Cluster 5), HYDEA – finanziato dal JU Clean Aviation e volto alla realizzazione di un primo prototipo dimostratore di motore turbofan ad

idrogeno, ed infine il progetto FFLECS, coordinato dal DIEF, nel quale sono analizzati due concetti rivoluzionari di combustore per motore aeronautico capaci di operare in modalità dual-fuel, alimentati da idrogeno e jet-A simultaneamente. A titolo d'esempio si riporta in Figura 109 un'immagine di una simulazione CFD multi-physics di un settore di combustore anulare a basse emissioni di NOx sviluppato in collaborazione con la società AvioAero.

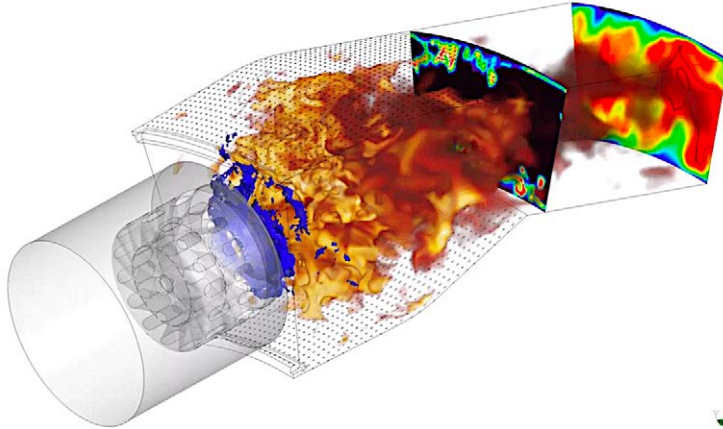


Figura 109 – Simulazione CFD LES di un combustore aeronautico a basse emissioni di NOx svolta in collaborazione con la società AvioAero.

AEROACUSTICGROUP – Aeroacustica³

Già dalla costituzione dell'Istituto e poi Dipartimento di Energetica, nel 1981, ebbero inizio le attività di ricerca sulle misure avanzate nelle macchine, avviate dal Prof. Giampaolo Manfrida. In particolare, la galleria del vento tarasonde, ammodernata più volte, è ancora in uso per lo sviluppo e tarature di sonde pneumatiche (Pitot e sonde direzionali a 3 e 5 fori) e sonde a filo caldo singole e multiple, fino a Mach =0,4. Essa permette la riduzione dei dati ed il calcolo delle incertezze di misura (velocità, pressione statica e totale ed angoli).

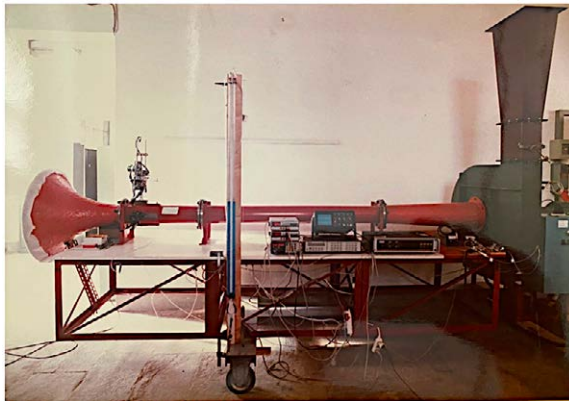


Figura 110 – Galleria tarasonde nel laboratorio (1981).

³ Questo paragrafo è stato scritto da Maurizio De Lucia e Francesco Taddei.

Successivamente, anche grazie a questa eredità il gruppo del Prof. Maurizio De Lucia, a partire dal 1989-90 ha avviato altri filoni di ricerche misuristiche. Inizialmente, il gruppo si è concentrato sulle misure radiometriche di temperatura sui primi stadi delle turbine a gas. Attività che ha portato allo sviluppo di uno standard oggi riconosciuto ed affermato nel settore. Le competenze acquisite nelle misure ad alta e altissima frequenza hanno successivamente permesso di estendere le ricerche alle misure di pressione ad alta frequenza. Da queste basi, intorno al 2004, sono state avviate ricerche specifiche nell'ambito dell'aeroacustica sperimentale.

Presso il Dipartimento sono state sviluppate e proposte tecniche ad oggi parzialmente standardizzate, non più basate sull'uso di microfoni tradizionali, bensì su sensori di pressione dinamici e/o miniaturizzati. In particolare, nel contesto del progetto europeo VITAL mirato allo sviluppo dei motori turbofan di nuova generazione, è stata avviata un'importante attività di ricerca in collaborazione con l'azienda AvioAero (Ora GE-Avio) per lo studio dei meccanismi di generazione del rumore tonale nei motori aeronautici che ha portato a sviluppare tecniche di misure innovative per lo studio sperimentale del rumore generato dalle interazioni aerodinamiche tra rotore e statore. Le tecniche di misura sviluppate hanno consentito lo sviluppo di una galleria rotante ancora disponibile presso il DIEF e sono state applicate inizialmente sul banco prova Cold Flow di AvioAero presso i laboratori di Torino Sangone su modelli in scala di turbine aeronautiche e successivamente sul banco prova PoloniaAero di GE Aviation per essere usate per la misurazione della potenza sonora su turbine in scala reale, per lo sviluppo di soluzioni progettuali «low-noise» per i futuri motori aeronautici. Di rilievo in questo ambito il contributo del gruppo di lavoro di Unifi nello sviluppo della sensoristica e nella messa a punto di metodologie sperimentali specifiche.

Dall'esperienza maturata nel campo delle misure acustiche sulle turbomacchine recentemente è stato avviato un nuovo filone di ricerca mirato allo sviluppo di rivestimenti fonoassorbenti per l'abbattimento del rumore nei motori aeronautici, i cosiddetti «LINER» acustici. Nel contesto del progetto di ricerca europeo ENOVAL (Engine Module Validators) iniziato nel 2013 è stato inizialmente progettato, realizzato e messo in funzione un banco prova a flusso radente (Grazing Flow Rig) per la misurazione dell'impedenza acustica dei liner in condizioni operative rappresentative dello scarico del motore aeronautico. Il banco prova, mostrato nell'immagine di seguito, è stato modificato ed ottimizzato e ad oggi permette di testare liner con velocità del flusso fino a numero di Mach uguale a 0,5 e temperatura fino a 450 °C.



Figura 111 – Banco prova in assetto TEST.

Il banco prova è stato recentemente validato per effettuare misure di impedenza acustica su campioni di liner innovativi per attività di ricerca e su componenti commerciali per attività di sviluppo industriale per aziende del settore aeronautico. L'immagine seguente mostra un campione di liner costruito tramite manifattura additiva presso il Dipartimento.



Figura 112 – Prototipo di LINER realizzato da Unifi-DIEF.

ARES Group – Sviluppo numerico e sperimentale di Motori a Combustione Interna⁴

Il gruppo ARES (Applied Research in Energy Systems) nasce nel 2001 grazie allo stimolo di alcune aziende toscane del settore delle due ruote, come Piaggio e Betamotor, che richiedevano supporto per lo sviluppo dei propri motori a due e quattro tempi.

Dal 2003 il gruppo ha ampliato le proprie attività aprendo a Prato il laboratorio LINEA (Laboratorio di INnovazione per l'Energia e l'Ambiente), con il supporto del PIN – Polo Universitario di Prato. In quegli anni è stato realizzato il primo banco prova motori, dotato di un freno a correnti parassite, che ha rappresentato la base per le successive attività sperimentali. Negli anni successivi la crescita è stata costante, grazie alla partecipazione a numerosi progetti di ricerca finanziati a livello regionale e nazionale e alla collaborazione con importanti aziende del settore, tra cui Piaggio, Aprilia, Guzzi, Betamotor, Ducati, Magneti Marelli ed EDI Progetti.

Un momento di svolta si è avuto nel 2011, quando il gruppo ha supportato la multinazionale giapponese Yanmar nell'apertura del suo centro di ricerca europeo, poi insediato a Firenze (Yanmar R&D Europe). Da allora sono state sviluppate numerose collaborazioni, sia numeriche sia sperimentali, che hanno portato anche al deposito di brevetti in ambito controllo e diagnostica attiva (basata, ad esempio, sull'analisi della pressione indiretta in camera di combustione, delle velocità istantanee del turbocompressore e dell'albero motore). Parallelamente, in collaborazione con Yanmar, HPE e Ferrari GT, è stato avviato un filone di ricerca dedicato all'analisi numerica per l'ottimizzazione termo-strutturale dei turbocompressori. Questo ambito, oggi rafforzato dai finanziamenti PNRR, rappresenta un'area chiave per lo sviluppo di nuove soluzioni legate all'impiego dell'idrogeno.

Un altro settore che ha visto un forte impegno del gruppo è quello dei motori due tempi (2T). Sono state messe a punto diverse configurazioni di iniezione diretta a bassa pressione che hanno consentito significativi miglioramenti in termini di efficienza e riduzione delle emissioni di idrocarburi incombusti. Di recente è stata brevettata una nuova tecnologia, l'AGDI (Air Guided Direct Injection), sviluppata da Unifi e attualmente in fase di validazione, che potrebbe garantire la conformità anche alle più stringenti normative EURO 5+.

⁴ Questo paragrafo è stato scritto da Giovanni Ferrara, Francesco Balduzzi e Luca Romani.

Negli ultimi anni l'attenzione si è concentrata in particolare sulla filiera dell'idrogeno. Con Yanmar R&D Europe sono stati sviluppati sistemi di controllo avanzati per la gestione ciclo-ciclo dell'iniezione di idrogeno, sia indiretta (PFI) che diretta (DI), al fine di evitare fenomeni di combustione anomala. Con Yanmar Italy sono in corso attività di industrializzazione di motori a idrogeno, mentre con Dumarey si sta lavorando a un banco per test di durata degli iniettori H_2 . In collaborazione con Asso Werke, invece, il gruppo sta sviluppando componentistica «calda» (pistoni e fasce elastiche) compatibile con la combustione di idrogeno, in un progetto finanziato dal MIMIT. Sempre in ambito PNRR, sono attivi progetti sull'iniezione d'acqua e sull'ibridizzazione di motori alimentati a idrogeno.

Nell'ottica di incrementare l'efficienza e contenere le emissioni inquinanti il gruppo ARES ha maturato esperienza anche nel design delle precamere di combustione (anche in collaborazione con HPE e Betamotor). Recentemente si è attivato un filone di ricerca per la combustione di ammoniaca che vedrà anche l'impiego di pre-camere attive (con iniezione di idrogeno) e passive. Infine, grazie a un finanziamento congiunto dell'Università di Firenze e della Fondazione Cassa di Risparmio di Firenze, è in fase di installazione una Rapid Compression Expansion Machine (RCEM), la prima in Italia. Questa sofisticata attrezzatura permetterà di analizzare in dettaglio i processi di combustione e di costruire database sperimentali di grande valore sui combustibili di interesse strategico per il futuro: idrogeno, ammoniaca, e-fuels e bio-combustibili.

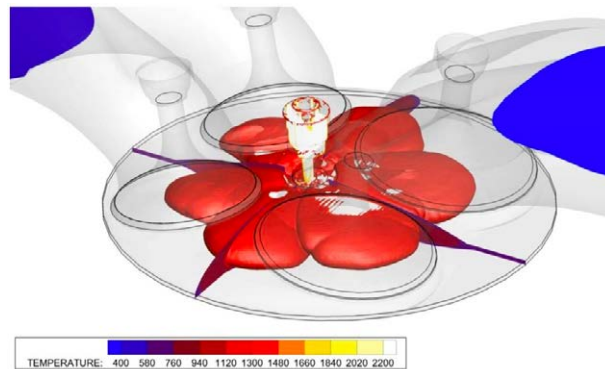


Figura 113 – Simulazione CFD 3D del processo di combustione in un motore dotato di precamera.

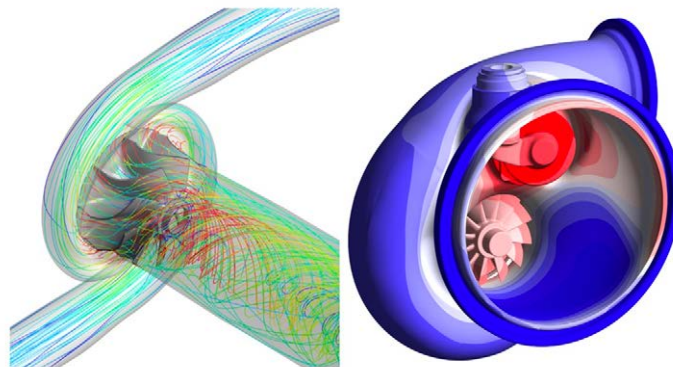


Figura 114 – Simulazioni CFD e termo-strutturali 3D di turbine di turbocompressori.

Riferimenti bibliografici

- Babazzi, G. et al. 2023. "Film Cooling and Cold Streaks Tracking on a Fully Cooled Nozzle Guide Vane Under Representative Combustor Outflow Conditions." *Journal of Turbomachinery* 145(2): 021005.
- Castelli, N. et al. 2024. "Experimental Analysis of Additively Manufactured Latticework Coupons." *Journal of Turbomachinery* 146(6): 061001.