



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

# GREEN POWERTRAIN

soluzioni tecnologiche e metodologiche  
di efficienza energetica dei  
motopropulsori per autotrazione  
per una mobilità collettiva sostenibile

realizzazione di piattaforme tecnologiche nell'ambito dell'accordo di programma:  
"distretti ad alta tecnologia, aggregazioni e laboratori pubblico privati per il  
rafforzamento del potenziale scientifico e tecnologico della regione campania"



# INDICE

<b>02</b>	<b>INFORMAZIONI GENERALI</b>
<b>04</b>	<b>PARTENARIATO DI PROGETTO</b>
<b>11</b>	<b>SINTESI DEL PROGETTO</b>
<b>13</b>	<b>SCENARIO DI RIFERIMENTO</b>
<b>16</b>	<b>TEMATICHE DEL PROGETTO</b>
<b>20</b>	<b>ATTIVITÀ DEL PROGETTO</b>
<b>26</b>	<b>STRUTTURA DEL PROGETTO</b>
<b>28</b>	<b>RISULTATI RAGGIUNTI</b>
<b>52</b>	<b>RICADUTE SUI PARTNER E SUL TERRITORIO</b>

# INFORMAZIONI GENERALI



## Procedura

Avviso pubblico manifestazione di interesse per la “realizzazione di piattaforme tecnologiche nell'ambito dell'accordo di programma: "distretti ad alta tecnologia, aggregazioni e laboratori pubblico privati per il rafforzamento del potenziale scientifico e tecnologico della regione campania”

## Titolo progetto

GREEN POWERTRAIN: soluzioni tecnologiche e metodologiche di efficienza energetica dei motopropulsori per autotrazione per una mobilità collettiva sostenibile

## Soggetto Gestore e Soggetto/i Partner coinvolti nel progetto

- Dattilo scarl (Soggetto Gestore del DAT)
- ANFIA Automotive
- CERICT, Centro Regionale Information and Communication Technology
- TEST, Technology, Environment, Safety, Transport

## ANFIA Automotive partecipa al progetto direttamente e mediante i suoi soci

- FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES ITALY S.p.A. (FCA ITALY)
- TECNOSISTEM (TSIS)

## Gli enti pubblici di ricerca CERICT e TEST partecipano al progetto tramite le seguenti Università e Dipartimenti afferenti

- Università degli Studi di Napoli Federico II, UNINA
- Dipartimento di Ingegneria Industriale - Sezione Meccanica ed Energetica (DII-Me)

- Università degli Studi della Campania “Luigi Vanvitelli”, SUN
- Dipartimento di Ingegneria (DI)
- Consiglio Nazionale delle Ricerche / Istituto Motori (IM)

## I temi e gli obiettivi del Progetto “Green Powertrain” afferiscono al documento RIS3 Campania, area di specializzazione “Trasporti di Superficie e Logistica Avanzata”

### All'interno di quest'area si possono individuare le Traiettorie Tecnologiche

- Mobilità Sostenibile ed Efficienza Energetica
- Soluzioni innovative per il contenimento delle emissioni inquinanti e per la riduzione dei consumi energetici (potenzialmente svilupparabili)
- Sistemi innovativi per l'alimentazione alternativa (potenzialmente svilupparabili)
- Tecnologie per la riduzione del rumore e delle vibrazioni (applicabili nel breve periodo)
- Nuove Configurazioni, Nuovi Materiali e Nuovi Processi per la Riduzione del Peso e l'Incremento delle Prestazioni del Mezzo di Trasporto
- Nuove tecniche e tecnologie di testing & validation per la verifica e validazione per qualifica e certificazione di sistemi e componenti (applicabile nel breve periodo)

**PARTENARIATO DI PROGETTO**

2

**DATTILO Scarl** rappresenta il Distretto campano alta tecnologia trasporti e logistica ed è costituita come società consortile a responsabilità limitata con il coinvolgimento della filiera automotive, ferroviaria e logistica. Gli enti pubblici di ricerca sono rappresentati dai Centri di Competenza Regionali dei Trasporti (TEST) e dell'ICT (CeRICT Centro Regionale di Ricerca per l'Information and Telecommunication Technologies). La missione di Dattilo è quella di favorire attività di R&S, formazione e divulgazione scientifica nei settori logistica avanzata, automotive e ferroviario.

**ANFIA AUTOMOTIVE** è una società consortile costituita il 22 febbraio del 2011, composta nella sua compagine sociale da PMI, Grandi aziende e Centri di ricerca che operano nel settore Automotive. La struttura svolge il ruolo di braccio operativo di ANFIA, Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica - socia fondatrice - per supportare sviluppo e promozione delle attività di ricerca e innovazione.

La Società consortile è stata infatti costituita per supportare l'insediamento e la crescita delle iniziative imprenditoriali afferenti il settore, attraverso la protezione, l'utilizzazione e lo sfruttamento dei risultati ottenuti attraverso l'acquisizione di nuove tecnologie e know-how per la gestione e lo sviluppo di progetti di ricerca, prevedendo anche lo svolgimento di attività di formazione e qualificazione di personale tecnico - scientifico. ANFIA Automotive ha l'obiettivo di creare un ambito di confronto tra gli attori nazionali

del settore Automotive che svolgono attività di R&D, per la definizione comune delle sfide di settore alla 'sfida sociale mobilità sostenibile' posta come prioritaria dalla Commissione Europea e ha come obiettivo quello di dare sostegno ai soci, attraverso il contributo del management di ANFIA alla definizione delle politiche di sostegno alle attività di Ricerca, Sviluppo e Innovazione a livello sia nazionale che Europeo e attraverso l'individuazione di possibilità per gli stessi di poter svolgere in sinergia attività di Ricerca Industriale e Sviluppo Sperimentale.

ANFIA Automotive sviluppa i progetti di ricerca e sviluppo attraverso i propri soci, in particolare al progetto Green Powertrain ha direttamente contribuito per le azioni di disseminazione dei risultati della ricerca.

**FCA Italy** fa parte del Gruppo Fiat Chrysler Automobiles (FCA), che progetta, sviluppa, produce e commercializza in tutto il mondo veicoli e relativi servizi post-vendita, ricambi e sistemi di produzione attraverso 102 stabilimenti produttivi, 46 centri di Ricerca e Sviluppo e concessionari e distributori in oltre 135 Paesi.

Il Gruppo opera nel mercato automotive con i marchi Abarth, Alfa Romeo, Chrysler, Dodge, Fiat, Fiat Professional, Jeep, Lancia, Ram e Maserati. Le attività del Gruppo includono anche Mopar (servizi post-vendita e ricambi), Comau (sistemi di produzione) e Teksid (fonderie).

FCA ITALY opera nel campo della motorizzazione, con particolare riguardo alla progettazione, produzione e commercializzazione di autovetture, veicoli speciali e veicoli commerciali senza limitazioni di portata, derivati, allestimenti, gruppi, sottogruppi, parti staccate, ricambi e accessori, nonché la commercializzazione di accessori, oggetti, articoli e prodotti appartenenti a qualsiasi classe merceologica, purché direttamente connessi con la vendita di autoveicoli e veicoli commerciali.

Nel campo dell'ingegneria di prodotto e processo FCA Italy svolge attività di ricerca, progettazione, sviluppo e sperimentazione attraverso 3 strutture:

- Product Development – nuove soluzioni tecniche per il rinnovo della gamma delle vetture.

- Powertrain Engineering – nuove motorizzazioni
- Manufacturing – nuovi processi di fabbrica.

Per il Powertrain Engineering il Centro Tecnico di Pomigliano d'Arco opera quale centro di ingegneria con incarichi operativi nella impostazione, sviluppo e miglioramento di motori e trasmissioni. Esso dispone di mezzi e risorse all'avanguardia nei seguenti campi:

- Impostazione e Sviluppo motori a benzina piccola e media cilindrata
- Sviluppo trasmissioni per autoveicoli manuali e servocontrollate
- Noise Vibration Harshness (NVH)
- Impostazione e Sviluppo Sistemi di Controllo motore e trasmissione
- Calibrazione Sistemi di Controllo motore e trasmissione

Il Centro Tecnico di Pomigliano d'Arco di FCA Italy – Dipartimento PE – impiega in totale 301 persone suddivise in 222 impiegati e 79 operai; di questi 9 con Master Degree o Dottorato, 113 con laurea magistrale, 22 con laurea di primo livello, 154 diplomati e 3 con licenza di scuola media inferiore.

Per le attività sperimentali il Centro dispone

di Laboratori allo stato dell'arte per:

- **MOTORI ED EMISSIONI** – 20 celle per prove motore, 5 celle veicolo di cui una climatico/barometrica e una per prove a temperatura controllata, 1 cabina per prove di evaporazione, 14 banchi a rullo per affidabilità motore e suoi componenti su vettura
- **NVH** – 3 sale prova motopropulsori, di cui una climatica, e 1 sala prova veicolo tutte semianecoiche
- **CONTROLLISTICA** – 19 sistemi HIL e Rapid Prototyping per lo studio delle strategie di gestione e di autodiagnosi dei sistemi elettronici di controllo motopropulsore;
- **COSTRUZIONE E PROTOTIPI** – attrezzature per realizzazione/modifica di attrezzature di prova, prototipi e manutenzione banchi prova

**TECNOSISTEM S.p.A.** è una moderna realtà operante nel settore dell'engineering evoluto. Fondata nel 1976 dalla famiglia Fiore, l'azienda ha investito i suoi oltre 40 anni di vita per consolidare ed accrescere le sue competenze, dando luogo ad un complesso processo evolutivo che la rende oggi unica sul panorama italiano per ciò che attiene alla diversificazione delle sue competenze, con conseguente diversificazione dei mercati di riferimento.

Dal 2005, oltre a consolidare il core business storico rappresentato dalla progettazione coordinata ed integrata di opere edili, realiz-

zate anche con l'apporto nella direzione lavori e nell'assistenza alle imprese nei settori dell'ingegneria civile, stradale, ambientale, industriale e ferroviaria, la società ha iniziato ad operare anche nel settore dell'ingegneria meccanica, aeronautica e della difesa, nonché nel settore edilizio operando in logica turn-key su commesse relative alla ristrutturazione di opere civili private.

La Tecnosistem è certificata secondo il Sistema di Gestione della Qualità in conformità ai nuovi requisiti richiesti dagli standard normativi UNI EN ISO 9001:2015 e UNI EN 9100:2016; dal 2015, inoltre, ha definito ed adottato un Modello di Organizzazione, Gestione e Controllo, in linea con le prescrizioni del D. Lgs 231/01.

L'azienda ha oltre 60 dipendenti, dei quali il 70% altamente qualificato, in quanto in possesso di titolo di laurea specialistica e/o dottorato di ricerca, per lo più in ingegneria, architettura e discipline economico-giuridico. Sono presenti esperti appartenenti a differenti aree tecniche, quali:

Ingegneri ed architetti, progettisti senior e junior, con competenze di progettazione in ambito infrastrutturale, impiantistico e civile, con formazione e specifica esperienza pregressa su attività di modellazione secondo la metodologia Building Information Modeling;

- Ingegneri analisti e modellatori senior, con competenze ed esperienze di calcolo termo-fluidodinamico, di analisi acustica e di simulazione di flussi di movimentazione multimodali;
- Ingegneri e tecnici, progettisti senior e junior, con competenze di progettazione in ambito industriale ed esperienza specifica su programmi aeronautici, automobilistici e ferroviari;
- Ingegneri analisti strutturali e modellatori agli elementi finiti senior, con competenze ed esperienze di analisi statiche e dinamiche.

La direzione aziendale mira a valorizzare l'esperienza intersettoriale, maturata sia in ambito gestionale che tecnico, per configurarsi come soggetto capace di operare con una vision da system-integrator in tutte le aree dell'ingegneria e, quindi, si rivolge ad una pluralità di clienti in ambito nazionale e internazionale. Il valore medio del fatturato annuo è superiore ad 8 M€:

Dal 2011 in poi, nel settore dei progetti finanziati, nazionali e regionali, Tecnosistem ha ricoperto e ricopre il ruolo di partner di numerose ATS. In particolare nell'ambito dei programmi dedicati al potenziamento ed al consolidamento di Distretti ad Alta Tecnologia e di Laboratori Pubblico-Privati, atti a favorire la presenza di competenze scientifico-tecnologiche di eccellenza, la società partecipa alle società consortili CTIF ed ANFIA, costituite nel Distretto ad Alta Tecnologia per il Trasporto e la Logistica, al

Distretto Campano dell'Aerospazio ed al Consorzio STRESS nel Distretto Tecnologico per le costruzioni.

## **Il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università di Napoli "Federico II"**

è nato il primo gennaio 2013 dalla confluenza di professori e ricercatori afferenti ai disciolti dipartimenti di: Energetica, Termofluidodinamica applicata e Condizionamenti ambientali (DETEC), Ingegneria Aerospaziale (DIAS), Ingegneria Economico-Gestionale (DIEG), Ingegneria Navale (DIN), Meccanica ed Energetica (DiME).

Il DII svolge attività di formazione universitaria, post-universitaria e di ricerca scientifica, incardinando in particolare la Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica e quella Magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente.

Le numerose attività di ricerca condotte presso la Sezione di Meccanica ed Energetica del DII riguardano la simulazione, la sperimentazione, la diagnostica e il controllo di componenti e sistemi termo-meccanici di conversione dell'energia, con particolare riferimento alle problematiche di progetto, di modellistica ed ottimizzazione delle prestazioni, di riduzione dell'impatto ambientale, e dello sfruttamento razionale delle risorse energetiche convenzionali e innovative.

Al progetto contribuiscono diversi gruppi di ricerca, coinvolti su tematiche di modellistica e ottimizzazione termo-fluidodinamica,

di raffreddamento e oleodinamica, e di recupero energetico allo scarico dei motori alternativi a combustione interna.

La qualificazione scientifica dei gruppi di ricerca è attestata dalle pubblicazioni, prevalentemente in ambito internazionale, e dalla partecipazione a progetti di ricerca finanziati con risorse pubbliche nazionali (Progetto PON01-02211: "MultiAirEvolution") e dell'Unione Europea (progetti H2020 EAGLE, DEVILS e "European Energy Research Alliance" - EERA), oltre che private

### **L'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"**

è parte della compagine di progetto con il Dipartimento di Ingegneria, contribuendo con competenze specifiche nella Trasmissione del Calore e nelle Macchine a Fluido. L'intensa attività di ricerca nel settore svolta da parte dei gruppi di Trasmissione del Calore e di Macchine è testimoniata dalle proficue collaborazioni con diverse aziende nazionali, e da occasionali collaborazioni con Enti di ricerca presenti sul territorio campano, quali CIRA, ENEA, CNR, Elasis, FCA, Piaggio Aereo e CRIS (Ansaldo).

I gruppi intrattengono inoltre collaborazioni con Università straniere, in particolare con UCR, Rutgers, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, ETH, Université d'Orléans. I gruppi di ricerca possiedono competenze nelle seguenti aree:

- Modellazione termofluidodinamica;
- Utilizzo di nanofluidi e mezzi porosi per lo scambio termico in regime di convezione

forzata e mista;

- Sviluppo di scambiatori di calore compatti con schiume metalliche e nanofluidi come fluidi refrigeranti all'interno dei tubi;
- Sviluppo di generatori termoelettrici;
- Modellazione dei motori a combustione interna;
- Tecniche sperimentali di velocimetria.

Il Dipartimento è dotato di un laboratorio di Trasmissione del Calore, equipaggiato con la strumentazione per la sperimentazione e con l'hardware/software necessari alla modellazione.

Il personale del Dipartimento è composto da 105 professori e ricercatori, 22 unità di personale amministrativo e 8 tecnici.

**L'Istituto Motori del C.N.R.** (IM) fondato nel 1940 svolge attività di ricerca fondamentale e applicata principalmente nel campo della conversione dell'energia e del suo impatto ambientale con l'obiettivo di migliorare l'efficienza, ridurre i consumi di combustibile e le emissioni inquinanti di propulsori per applicazioni terrestri, navali e aeronautiche, nonché negli impianti fissi di generazione di energia.

IM vanta una consolidata e riconosciuta esperienza per:

- Lo studio e l'ottimizzazione di sistemi di propulsione avanzati mediante modellistica e simulazione dei processi termo-fluidodinamici
- L'applicazione di metodologie per la diagnostica della combustione e della formazione degli inquinanti
- La progettazione della componentistica motore

- La caratterizzazione e ottimizzazione dei sistemi di post-trattamento,
- Lo sviluppo di sensoristica (reale e virtuale) per il controllo
- L'ottimizzazione dell'interazione tra motore e combustibile

In IM sono presenti 22 laboratori distribuiti su un'area di oltre 4'000 m<sup>2</sup>.

Tutti i laboratori sono allo stato dell'arte della tecnologia e in continuo sviluppo con banchi per i test dinamici dei motori fino a 400 kW alimentati con combustibili liquidi e gassosi (fossili e da fonti rinnovabili), sistemi per la caratterizzazione della conversione dell'energia fino a 50 kW e per i test dinamici sulla propulsione elettrica, sistemi di celle a combustibile fino a 100 kW e banchi prova per veicoli a 4-2 ruote.

L'IM consta di 76 unità di personale di cui 53 ricercatori, 18 tecnici, 5 amministrativi e 15 tra studenti di PhD e assegnisti.

Al progetto contribuiscono diversi gruppi di ricerca, coinvolti su tematiche di modellistica e ottimizzazione termo-fluidodinamica, diagnostica della combustione, sensoristica avanzata, valutazione delle emissioni acustiche, regolamentate e non dei veicoli in uso reale.

L'IM ha partecipato e partecipa a numerosi programmi di ricerca Nazionali, Europei (H2020 come DIEPER, SUREAI-23, REWARD, RESIDUE2HEAT) e frutto di cooperazioni internazionali. Inoltre è partner di consorzi di ricerca con altri Enti ed aziende del settore (CERICT, TEST, ATENA).

La visibilità scientifica dei gruppi di ricerca

IM afferenti al progetto è attestata anche dalle pubblicazioni di comprovato impatto tecnico e rilevanza internazionale, oltre che dall'impegno in qualità di esperti e valutatori di numerosi progetti a finanziamento Nazionale ed Internazionale.

Infine l'IM da ottobre 2019 è confluito nel nuovo Istituto del CNR di Scienze e Tecnologie per l'Energia e la Mobilità. Sostenibile, STEMS.



3

**SINTESI DEL PROGETTO**

Il Progetto individua e sviluppa, mediante tecniche di analisi virtuale e sperimentale, soluzioni e metodologie per incrementare l'efficienza energetica dei motopropulsori per trazione terrestre. Queste sono state validate mediante dimostratori che, seppure necessariamente mirati ad un particolare utilizzo, non ne limitano affatto l'impiego trasversale su diverse tipologie di veicolo (autovetture, veicoli commerciali, autobus, motrici ferroviarie termiche, autocarri, ecc.)

Le attività sono state finalizzate allo studio ed alla integrazione sinergica di tecnologie evolute, di cui è stata anche valutata la compatibilità industriale. Le principali sono:

- Termodinamica ad alta efficienza;
- Riduzione degli attriti, ottenuta anche mediante il condizionamento dei fluidi motore con recupero di energia dai gas di scarico
- Organi ausiliari del motore a comando elettrico;
- Produzione di energia elettrica dai gas di scarico;
- Utilizzo di nanotecnologie per migliorare l'efficienza di scambio termico;
- Utilizzo di biocombustibili ad alta efficienza globale (well-to-wheel);
- Controllo dei processi tramite sensoristica avanzata
- Metodologie virtuali di riduzione dell'impatto acustico finalizzate al comfort dei passeggeri;
- Metodologie per l'impiego del Metano nei mezzi di trasporto;
- Metodologie per l'incremento dell'efficienza dei mezzi di trasporto collettivo

4

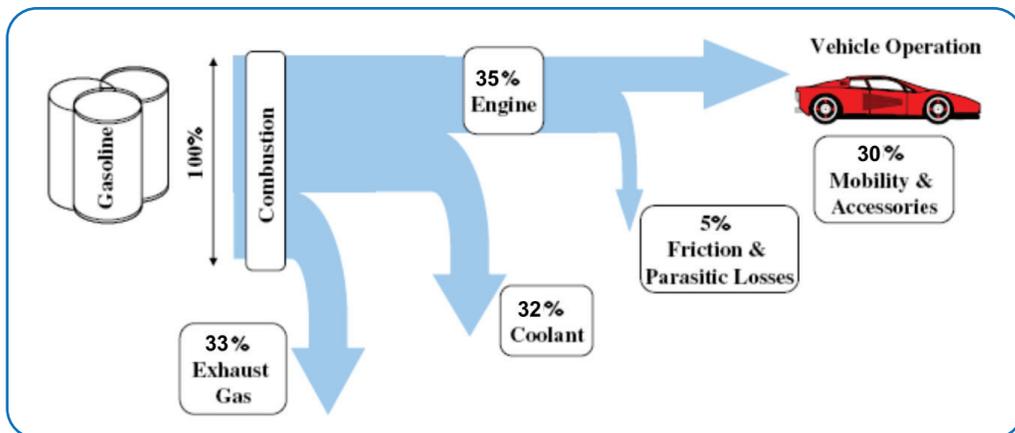
**SCENARIO DI RIFERIMENTO**

La consapevolezza ambientale e la preoccupazione per gli effetti della produzione di CO<sub>2</sub> sono da molto tempo un fattore determinante per la promozione dello sviluppo tecnologico nell'industria automobilistica. In tutto il mondo, inoltre, i cambiamenti nel tipo di rifornimento e nell'uso delle risorse stanno aumentando l'urgenza di un ulteriore progresso. Tali cambiamenti richiederanno svariati contributi da parte di tutte le tecnologie implicate nel progresso tecnologico del mondo automobilistico.

Il mondo si trova ad affrontare numerosi problemi in materia di energia dei trasporti. La domanda mondiale di petrolio continua ad aumentare con prezzi del petrolio fortemente oscillanti e dipendenti da scenari geopolitici molto variabili. Vi è una crescente preoccupazione per l'effetto dei gas serra, in particolare anidride carbonica, sull'ambiente. Tutti questi problemi stanno portando da un lato alla richiesta di ottenere la maggiore quantità di energia utile da ogni litro di combustibile bruciato, e dall'altro di diversificare i combustibili utilizzabili per l'autotrazione (combustibili alternativi), le fonti di approvvigionamento e la tecnologia di produzione, con particolare riguardo ai combustibili non di origine fossile (fonti rinnovabili)

Con gli obiettivi Horizon 2020 ormai alle porte e con ulteriori restrizioni sulle emissioni allo studio, lo scenario tecnologico dei motori a combustione interna impone lo sviluppo di differenti soluzioni architettoniche in termini di accoppiamento propulsore- combustibili e post-trattamento, oltre che al tema dell'elettrificazione (motopropulsori ibridi), per garantire vantaggi significativi sull'efficienza globale sia in termini di risparmio delle fonti energetiche che dal punto di vista dell'abbattimento dei gas serra (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).

In quest'ottica, per motivi dovuti alla Fisica, il livello di efficienza dei motori termici è relativa-



mente basso (i migliori esempi, per grandi applicazioni marine o per la produzione di energia elettrica, hanno rendimenti dell'ordine del 50%): in termini pratici questo significa che una rilevante parte dell'energia chimica disponibile dal combustibile viene persa attraverso i gas di scarico ed il fluido di raffreddamento

La ricerca nel campo dei motori termici non vede riduzioni di intensità nonostante la diffusione in crescita delle soluzioni elettrificate (propulsori ibridi e puramente elettrici) e l'impiego di questi propulsori per l'autotrazione è previsto ancora per diversi anni: infatti l'ulteriore incremento di efficienza è di primaria importanza per conseguire gli obiettivi di riduzione di CO<sub>2</sub> contenendo i costi, in quanto consente di limitare la quota parte di componenti elettrici sull'autoveicolo (batterie, sistemi di gestione dell'energia elettrica) caratterizzati da costi molto elevati.

**TEMATICHE DEL PROGETTO**

5

Questo Progetto è stato impostato per TEMI, alcuni dei quali tra loro sinergici, in una prima fase sviluppati utilizzando tecniche di analisi virtuale; nella successiva fase di validazione sperimentale sono stati allestiti ed utilizzati dimostratori fisici: pur se questi ultimi sono necessariamente mirati ad un particolare utilizzo, non è preclusa la possibilità che le soluzioni studiate possano essere utilizzate su vari tipi di veicoli.

In considerazione dello scenario descritto i temi importanti di studio in questo Progetto riguardano lo studio di soluzioni mirate ad utilizzare energia altrimenti persa, in particolare quella contenuta nei gas di scarico in quanto i livelli di temperatura che li caratterizzano sono più favorevoli ad un recupero efficiente. Questo concerne sia la produzione di energia elettrica, con differenti modalità, sia il condizionamento dei fluidi motore (raffreddamento e lubrificazione): quest'ultima tecnologia consente di ridurre il livello degli attriti del motore, sia in condizioni di regimazione termica sia in condizioni regimate con basse potenze impegnate.

Convertendo parte dell'energia dai gas di scarico in elettricità, nel migliore dei casi si potrebbe eliminare il generatore elettrico dell'autoveicolo, riducendo costi, pesi, attriti e complessità architetture. Tuttavia anche solo riducendo il carico elettrico sull'alternatore si riduce la quota parte combustibile che viene consumato per la generazione di questa energia elettrica.

Nondimeno uno dei temi principali del

Progetto riguarda lo studio di soluzioni per l'ulteriore miglioramento dell'efficienza termodinamica e meccanica del motore. In quest'ottica rientrano:

- Alto rapporto di compressione;
- Elevata efficienza termo-fluidodinamica;
- Riduzione attriti

Quest'ultimo obiettivo è stato perseguito anche con l'utilizzo di tecnologie che consentono di condizionare i fluidi motore a spese del calore (perso) dei gas di scarico, come sopra detto. Gli obiettivi di elevata efficienza termodinamica e di alto rapporto di compressione sono stati conseguiti anche mediante l'analisi integrata sperimentale/numerica dettagliata della termodinamica della combustione e la possibilità di una regolazione più accurata dei parametri di controllo motore mediante l'impiego di sensoristica avanzata, altro oggetto di studio di questo Progetto.

Ulteriore tema di studio è stato l'utilizzo di organi ausiliari a comando elettrico (pompe olio e liquido di raffreddamento motore). L'azionamento degli organi ausiliari rappresenta una non trascurabile aliquota delle perdite di lavoro utile in un motore termico. La possibilità di impiegare organi ausiliari a comando elettrico consente, svincolando la velocità di rotazione da quella del propulsore, di ottimizzare le condizioni operative dei componenti ai diversi punti di funzionamen-

to motore, riducendo la potenza assorbita per il loro azionamento consentendo di ridurre gli sprechi.

Inoltre si considera qui il fatto di poter utilizzare per il loro movimento energia elettrica non generata a spese del combustibile chimico, ma recuperata o dai gas di scarico come sopra descritto, o in altra maniera (nelle applicazioni ibride: durante le decelerazioni e le frenate, a partire dall'energia cinetica del veicolo).

Un altro tema sinergico verso il miglioramento dell'efficienza del motore e del veicolo riguarda l'uso di nanofluidi (miscela bifasica di un fluido base e particelle di dimensioni nanometriche) e schiume metalliche per rendere molto più efficiente lo scambio termico, in particolare riducendo da un lato le temperature di parete della camera di combustione, il che contribuisce alla possibilità di incrementare il rapporto geometrico di compressione allontanando l'insorgenza della detonazione, e dall'altro consentendo di ridurre le dimensioni del radiatore di raffreddamento del veicolo, con benefici effetti sull'efficienza aerodinamica.

Ulteriore tema ha riguardato l'operatività del motore termico nell'utilizzo dei più promettenti combustibili ricavati da fonti rinnovabili, al fine di ottenere un'elevata efficienza prestazionale e la riduzione delle emissioni (gassose, particellari e acustiche). Ciò ha comportato lo sviluppo di differenti soluzioni architettoniche in termini di accoppia-

mento propulsore-combustibili per ottenere vantaggi significativi sull'efficienza globale sia in termini di risparmio delle fonti energetiche che dal punto di vista dell'abbattimento dei gas serra dai veicoli stradali.

L'insieme di queste tecnologie è strettamente collegata alla continua evoluzione dei combustibili minerali e da fonti rinnovabili (etanolo, butanolo, gas naturale) in rapporto al loro impatto sull'efficienza di motori innovativi e sulla relativa componentistica.

Infine vi sono alcuni temi che più specificamente si intendono "trasversalizzabili" su altre filiere distrettuali – Ferroviario e Logistico – che qui vengono individuati come "Tecnologie Green":

- Comfort acustico dei passeggeri (riduzione dell'inquinamento acustico "interno" ai veicoli). Tale aspetto è di particolare importanza per il miglioramento dell'abitabilità del veicolo e per la sicurezza dei passeggeri. In tale ambito sono state sviluppate metodologie numeriche finalizzate alla identificazione delle sorgenti di rumore.
- Utilizzo di (bio)combustibili alternativi nei mezzi di trasporto. Temi di studio sono: termodinamica, combustione, emissioni inquinanti dei motori alimentati con metano e sulla tecnologia degli impianti di alimentazione a metano. L'impiego di gas metano e (bio)metano nei propulsori endotermici ha effetti positivi sulle emissioni inquinanti nonché sulle emissioni di gas serra (GHG).

Inoltre esso riduce la dipendenza del settore trasporti dalle fonti energetiche fossili. Pertanto in tale ambito, sono state analizzate soluzioni per l'utilizzo del metano nelle motorizzazioni ad accensione comandata e diesel. In particolare sono stati condotti studi su termodinamica, combustione, emissioni inquinanti dei motori diesel alimentati con Metano, nonché metodologie per il miglioramento dell'efficienza dei motori SI-CNG. Inoltre sono state considerate soluzioni innovative per gli impianti di alimentazione a Metano;

- Metodologie per l'incremento dell'efficienza dei mezzi di trasporto collettivo. Sono stati svolti studi su metodologie per la riduzione della potenza assorbita dai sistemi oleodinamici e pneumatici di bordo in veicoli per il trasporto collettivo, ed inoltre su metodologie per il recupero di energia meccanica applicato a veicoli per il trasporto collettivo.

**ATTIVITÀ DEL PROGETTO**

6

Come detto precedentemente, questo progetto si articola su temi diversi, che non necessariamente devono essere utilizzati insieme in applicazioni pratiche. Tuttavia alcune delle soluzioni studiate sono state valutate in accoppiamento.

Fulcro del Progetto è un motore termico dimostratore, del tipo per impiego automobilistico, progettato, realizzato e analizzato sperimentalmente per validare le metodologie ed i modelli impiegati nelle fasi anteriori. In particolare è un motore alternativo ad accensione comandata, capace di funzionare con diversi tipi di combustibile liquido (benzina, biocombustibili tipo Etanolo e Butanolo), dotato di un sistema di variazione continua della fasatura della distribuzione: questo sistema è concepito da un lato per migliorare le prestazioni in pieno carico e dall'altro per migliorare l'efficienza, riducendo le perdite di pompaggio ai carichi parziali secondo la modalità ricircolo interno dei gas di scarico (iEGR) + ciclo Atkinson. Esso inoltre è dotato del cosiddetto "crankshaft offset" per ridurre le perdite organiche legate agli stantuffi e da un comando della distribuzione del tipo "roller finger" sempre per ridurre gli attriti, ma anche per migliorare l'efficienza volumetrica. La distribuzione è a due valvole per cilindro per motivi sia di efficienza meccanica sia di basso costo: un aspetto fondamentale in questo senso è stato lo studio di soluzioni per massimizzare l'efficienza volumetrica e l'efficienza di combustione.

Conformemente ai temi di studio sopra descritti, il motore ha un alto rapporto di

compressione per motivi di efficienza termodinamica. Una delle soluzioni tecnologiche adottate per sfruttare questo contenuto è il ricircolo esterno dei gas di scarico (eEGR) raffreddati. Più in generale questo tema ha comportato lo studio del sistema di combustione mediante modelli termo-fluidodinamici mono- e tri-dimensionali volti a: ottenere elevate efficienze; contenere i fenomeni di detonazione; determinare preliminarmente il rapporto di compressione ottimo e, in ultima analisi, le prestazioni e i consumi.

Gli organi ausiliari sono di tipo tradizionale: l'impiego del comando elettrico e di modalità di funzionamento specifiche/innovative è stato valutato separatamente ed integrato con tecniche di analisi termodinamica e di modellazione virtuale del veicolo. A questo scopo sono stati utilizzati dati sperimentali ottenuti su prototipi di pompa olio installati su banchetto prova specifico.

L'analisi sperimentale del motore è stata svolta sia con utilizzo di benzina commerciale (RON95) che con Etanolo e Butanolo, due biocombustibili scelti tra le soluzioni studiate in ambito specifico; i risultati sono stati utilizzati sia per verificare e validare modelli termo-fluidodinamici del motore, sia come riscontro sperimentale delle attività sui combustibili alternativi.

Gli organi ausiliari sono di tipo tradizionale: l'impiego del comando elettrico e di modalità di funzionamento specifiche/innovative è stato valutato separatamente ed integrato con tecniche di analisi termodinamica e di modellazione virtuale del veicolo. A questo scopo sono stati utilizzati dati sperimentali ottenuti su prototipi di pompa olio installati su banchetto prova specifico.

L'analisi sperimentale del motore è stata svolta sia con utilizzo di benzina commerciale (RON95) che con Etanolo e Butanolo, due biocombustibili scelti tra le soluzioni studiate in ambito specifico; i risultati sono stati utilizzati sia per verificare e validare modelli termo-fluidodinamici del motore, sia come riscontro sperimentale delle attività sui combustibili alternativi.

Mediante questo dimostratore sono state fatte analisi su possibili vantaggi legati all'utilizzo di tecnologie mirate ad incrementare l'efficienza di scambio termico, sia attraverso l'incremento della superficie di scambio termico mediante schiume metalliche sia con l'impiego dei nanofluidi. Ciò consente un miglioramento dei gradienti e dei livelli di temperatura, soprattutto per quanto riguarda la riduzione delle temperature metallo in camera di combustione e del relativo effetto sulla resistenza alla detonazione: in quest'ottica queste tecnologie possono essere sinergiche verso l'impiego di elevati rapporti di compressione, tema di studio importante di questo Progetto.

Lo studio è basato sulla ricerca di possibili condizioni di trade-off generate dalla concomitanza di due fenomeni contrapposti riconducibili alla ridotta temperatura di parete: da un lato i potenziali benefici sul rendimento termodinamico generati dall'adozione di un rapporto di compressione volumetrico maggiore; dall'altro l'aumento della potenza termica scambiata con le pareti del cilindro, trasferita al liquido di

raffreddamento del motore e conseguentemente sottratta al ciclo termodinamico.

È stato analizzato un modello virtuale di sistema per il recupero termodinamico di energia dai gas di scarico a ciclo Rankine con fluido organico (ORC). È stato considerato l'utilizzo di differenti fluidi evolventi e l'accoppiamento con il motore termico.

Il parallelo è stato studiato un sistema di recupero di energia dai gas di scarico a effetto Seebeck, che consente di produrre energia elettrica utilizzabile sul veicolo. Nel corso di queste attività sono state definite in dettaglio le modalità di funzionamento e la tipologia di accoppiamento con il motore termico.

Un ulteriore sistema studiato per recuperare energia dai gas di scarico, seppure in maniera indiretta, prevede il condizionamento dell'olio lubrificante, che consente di ridurre le perdite per attrito nelle fasi di regimazione termica del motore. Questo sistema consente la regolazione

della temperatura, necessaria per massimizzare l'efficienza e limitare i livelli di temperatura dell'olio una volta regimato.

Un aspetto importante del Progetto è stato lo sviluppo di metodologie innovative. Queste hanno riguardato, tra l'altro:

- Modelli evoluti di combustione e detonazione, anche in presenza di elevati tenori di gas riciccolati, integrati in modelli termo-fluidodinamici del motore
- Modelli integrati numerico/sperimentali mirati a caratterizzare il processo di evoluzione dello spray di combustibile, l'interazione con il moto d'aria e la combustione nel cilindro
- Metodologie di diagnostica innovativa e simulazione multidimensionale del processo di formazione della miscela e della combustione, con sperimentazione eseguita su motori reali e otticamente accessibili;
- Metodologie innovative per l'analisi dei circuiti di lubrificazione e raffreddamento, utilizzate anche per realizzare studi approfonditi di altri tipi di sistemi, come gli impianti pneumatici presenti su mezzi di trasporto collettivo quali treni e autobus;
- Metodologie numerico/sperimentali di correlazione tra indici acustici e indici vibrazionali
- Metodologie di analisi numerico/sperimentale di prestazioni e consumi su veicolo ibrido, parametrizzato rispetto ai dimensionamenti elettrici (motore, batterie) e con l'utilizzo di ausiliari elettrici

Ulteriori attività hanno riguardato la valutazione, in termini di potenziale riduzione dell'impatto ambientale, di metodologie che sono caratterizzate da "trasversabilità" di applicazione per quelle motorizzazioni maggiormente impiegate per il trasporto collettivo e delle merci.

Con riferimento ai motori per il trasporto collettivo sono state analizzate differenti soluzioni architettoniche del sistema di alimentazione del combustibile in relazione all'impiego di combustibili a bassa emissione di CO<sub>2</sub>. Sono state valutate le prestazioni, le emissioni inquinanti (gassose e particellari in termini di massa/qualità e numero) di configurazioni motore in modalità dual fuel (metano-Diesel) e ad accensione comandata CNG dotate di sistema EGR. La sperimentazione, con il contributo di indagini diagnostiche effettuate su sistemi dedicati (modalità di fuel supplying) e sui motori al banco prova (valutando specifiche esigenze di modulazione) ha consentito di valutare le soluzioni tecnologiche più idonee dal punto di vista dell'impianto (serbatori e linea di alimentazione) e del sistema di iniezione (relativamente alle caratteristiche funzionali).

Ulteriori attività hanno riguardato la valutazione, in termini di potenziale riduzione dell'impatto ambientale, di metodologie che sono caratterizzate da "trasversabilità" di applicazione per quelle motorizzazioni maggiormente impiegate per il trasporto collettivo e delle merci.

Con riferimento ai motori per il trasporto collettivo sono state analizzate differenti soluzioni architettoniche del sistema di alimentazione del combustibile in relazione all'impiego di combustibili a bassa emissione di CO<sub>2</sub>. Sono state valutate le prestazioni, le emissioni inquinanti (gassose e particellari in termini di massa/qualità e numero) di configurazioni motore in modalità dual fuel (metano-Diesel) e ad accensione comandata CNG dotate di sistema EGR. La sperimentazione, con il contributo di indagini diagnostiche effettuate su sistemi dedicati (modalità di fuel supplying) e sui motori al banco prova (valutando specifiche esigenze di modulazione) ha consentito di valutare le soluzioni tecnologiche più idonee dal punto di vista dell'impianto (serbatoi e linea di alimentazione) e del sistema di iniezione (relativamente alle caratteristiche funzionali).

Per la motorizzazione Dual-Fuel sono stati eseguiti studi numerici ed indagini sperimentali su di un motore prototipo al fine di definire con la migliore approssimazione possibile le potenzialità di risparmio energetico, la riduzione dell'impatto ambientale complessivo, i limiti di applicabilità in relazione alla taglia del motore e della sua applicazione.

Il motore di riferimento è di derivazione automobilistica con alimentazione di gas naturale in fase gassosa allocata nel collettore di aspirazione. Il sistema di alimentazione gasolio è di tipo common rail di ultima generazione. Il sistema di scarico è dotato di catalizzatore ossidante e filtro per il particolato.

Le attività modellistiche e sperimentali sono state mirate allo studio dettagliato delle modalità di funzionamento del propulsore Dual-Fuel e delle relative problematiche, per individuare le soluzioni più idonee per la

massimizzazione dello sfruttamento del gas naturale nel motore ad accensione per compressione entro accettabili limiti di rumorosità, impatto ambientale e robustezza del sistema. Ciò ha consentito di individuare le caratteristiche geometriche, dimensionali e funzionali di un motore prototipo Dual-Fuel competitivo sul piano del risparmio energetico e delle emissioni nocive (GHG incluse) rispetto ai più moderni propulsori ad accensione comandata e Diesel.

Le applicazioni di recupero di energia dai gas di scarico studiate per i veicoli per trasporto privato sono state estese ai settori della logistica e dei veicoli commerciali, caratterizzati peraltro da vincoli dimensionali e di posizione meno stringenti. Questi sistemi ORC costituiscono inoltre una valida possibilità tecnologica per il recupero del calore di scarto dai grandi motori utilizzati per la generazione elettrica. Analoghe ed immediate ricadute sono ipotizzabili in settori di grande interesse strategico, ovvero da quello dei veicoli commerciali heavy duty, dal settore ferroviario in cui la trazione è affidata alla propulsione Diesel-elettrica e dal settore navale dominato dai grandi motori Diesel. E' stata analizzata la possibilità di utilizzare in contemporanea ai gas di scarico altre fonti di calore di scarto presenti soprattutto sui veicoli di stazza più grande utilizzati nel campo ferroviario e logistico (trasporto merci).

I modelli di simulazione precedentemente messi a punto sono stati ulteriormente sviluppati per l'analisi di motori diesel per la trazione ferroviaria e a motorizzazioni per il trasporto merci su gomma ed in mare (mezzi di trasporto per utilizzi logistici), mettendo in evidenza le peculiari differenze e l'estendibilità dei risultati ricavati su un motore per autoveicoli.

Sulla base delle metodologie sviluppate per l'analisi dei circuiti di lubrificazione e raffreddamento, sono stati realizzati studi approfonditi sugli impianti pneumatici presenti su mezzi di trasporto collettivo quali treni e

autobus. L'obiettivo è quello di migliorare tali sistemi onde ottenere un aumento della loro funzionalità, rivolgendo una particolare attenzione sia al conseguimento di un risparmio energetico, sia all'aumento del comfort acustico dei passeggeri.

# STRUTTURA DEL PROGETTO



Il Progetto è stato articolato in 5 Obiettivi Realizzativi (O.R.); i primi 4 sono finalizzati allo studio di soluzioni di incremento dell'efficienza del motore per utilizzo automobilistico, il quinto è invece mirato a studiare possibili estensioni ad altri impieghi dei risultati ottenuti e delle metodologie sviluppate. Ogni O.R. raggruppa diverse attività, ognuna delle quali svolta da uno o più Proponenti:

**O.R. 1** Tecnologie e metodologie innovative disponibili nel medio termine

**1.1** Analisi delle problematiche legate all'efficienza energetica dei propulsori termici

**1.2** Prospettive di impiego di tecnologie innovative per la riduzione della CO<sub>2</sub>

**O.R. 2** Definizione dell'architettura motoristica di riferimento

**2.1** Definizione delle caratteristiche termo-fluidodinamiche del propulsore

**2.2** Definizione dei componenti meccanici principali del propulsore

**O.R. 3** Analisi modellistiche sull'architettura motoristica di riferimento

**3.1** Modellazione e ottimizzazione termo-fluidodinamica propulsore

**3.2** Modellazione sottosistemi meccanici

**3.3** Modellazione impianti ausiliari e loro componenti

**3.4** Modellazione sistemi di recupero di energia allo scarico

**O.R. 4** Individuazione dei casi-pilota e validazione sperimentale

**4.1** Soluzioni progettuali per la realizzazione

dei dimostratori

**4.2** Analisi sperimentali su organi ausiliari e recupero di energia allo scarico

**4.3** Analisi sperimentali su motori

**4.4** Analisi parametrica virtuale degli impatti su veicolo

**O.R. 5** Sviluppo di metodologie "green" trasversalizzabili in altri ambiti (ferroviario, logistica)

**5.1** Metodologie di riduzione dell'impatto acustico e dei VOC finalizzate al comfort dei passeggeri

**5.2** Metodologie per l'impiego del Metano nei mezzi di trasporto

**5.3** Metodologie per l'incremento dell'efficienza dei mezzi di trasporto collettivo

**5.4** Disseminazione risultati del progetto di ricerca

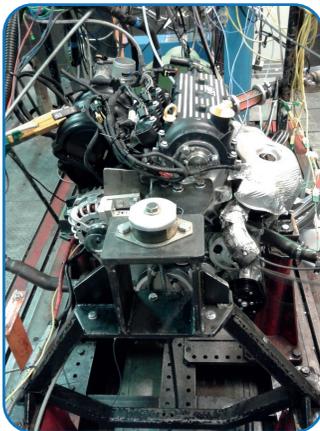
**RISULTATI RAGGIUNTI**

88

I “deliverables” di progetto sono costituiti in gran parte di documenti tecnici che illustrano le attività svolte e i risultati raggiunti, modelli matematici (CAD, FEM, termo-fluidodinamici, ...), disegni costruttivi.

Inoltre è stato realizzato un motore dimostratore, di nuova concezione, che ha prodotto dati sperimentali e relative analisi. Questi dati sono stati utilizzati per validare i modelli numerici studiati nel corso del Progetto, oltre che per verificare gli obiettivi quantitativi di Progetto

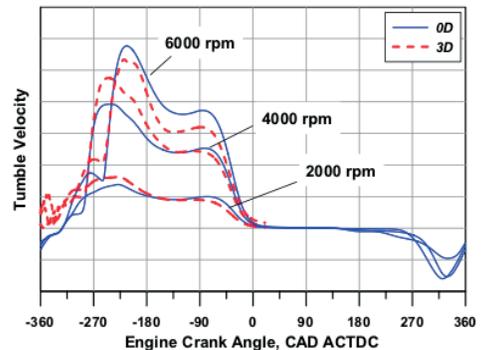
Cilindrata	Ca. 1,0 dm <sup>3</sup>
N° di cilindri	3
Rapporto Corsa/Alesaggio	≥ 1.2
Rapporto di compressione	≥ 12
Distribuzione	SOHC - 2 valvole per cilindro - Variatore continuo di fase idraulico
Alimentazione	PFI a bassa pressione
Potenza specifica	≥ 50 kW/dm <sup>3</sup>
Regime di potenza massima	5'500 < X < 6'500 1 <sup>-1</sup>
pme massima	> 1.1 MPa
Regime di coppia massima	2000 < X < 4'000 1 <sup>-1</sup>
Consumo specifico	
2'000 @ 200 [1 <sup>-1</sup> @ kPa]	< 353 g/kW/h
3'000 @ 300 [1 <sup>-1</sup> @ kPa]	< 305 g/kW/h
4'000 @ 500 [1 <sup>-1</sup> @ kPa]	< 272 g/kW/h



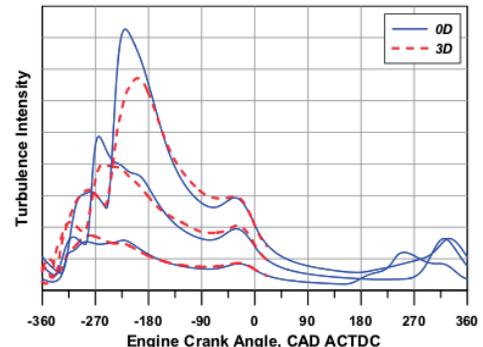
Motore dimostratore

L'impostazione termo-fluidodinamica di questo motore è stata studiata mediante modelli di calcolo mono- e tri-dimensionali, che hanno contribuito a definire l'architettura del sistema di combustione, i principali parametri geometrici, determinare preliminarmente il rapporto di compressione ottimo e, in ultima analisi, prevedere le prestazioni e i consumi.

Sono stati sviluppati modelli di turbolenza, combustione e detonazione, poi implementati all'interno del modello termo-fluidodinamico del motore. In parallelo la modellistica tri-dimensionale ha consentito di calibrare e ottimizzare i modelli mono-dimensionali.

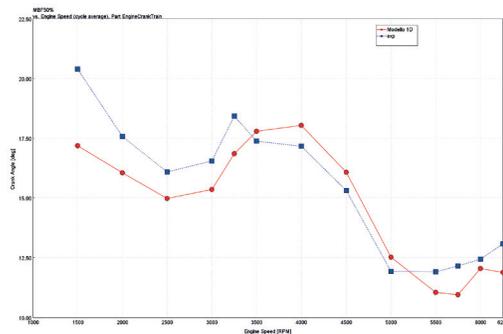
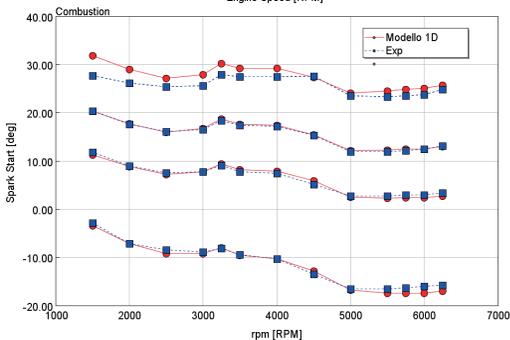
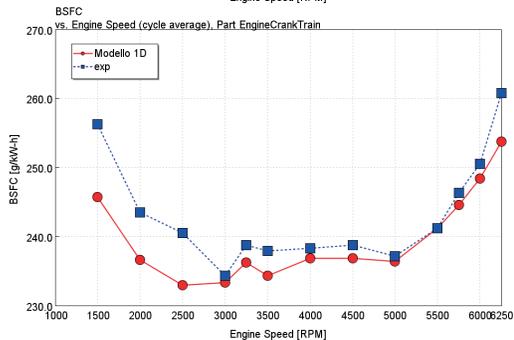
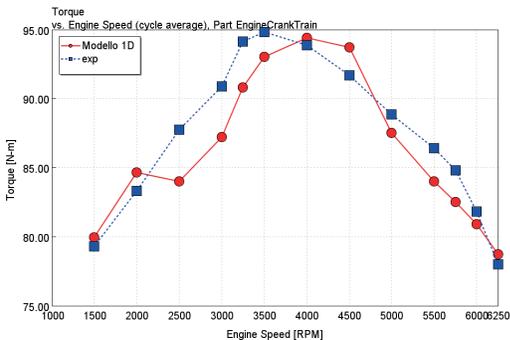
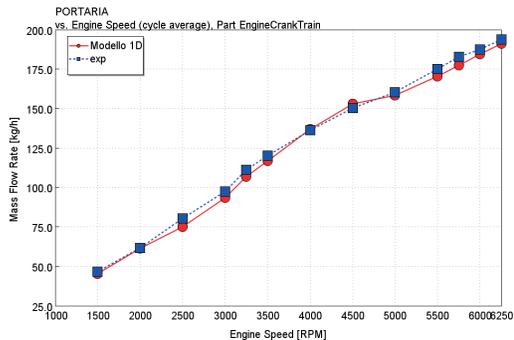


Velocità del moto di tumble



e intensità di turbolenza a diverse velocità di rotazione

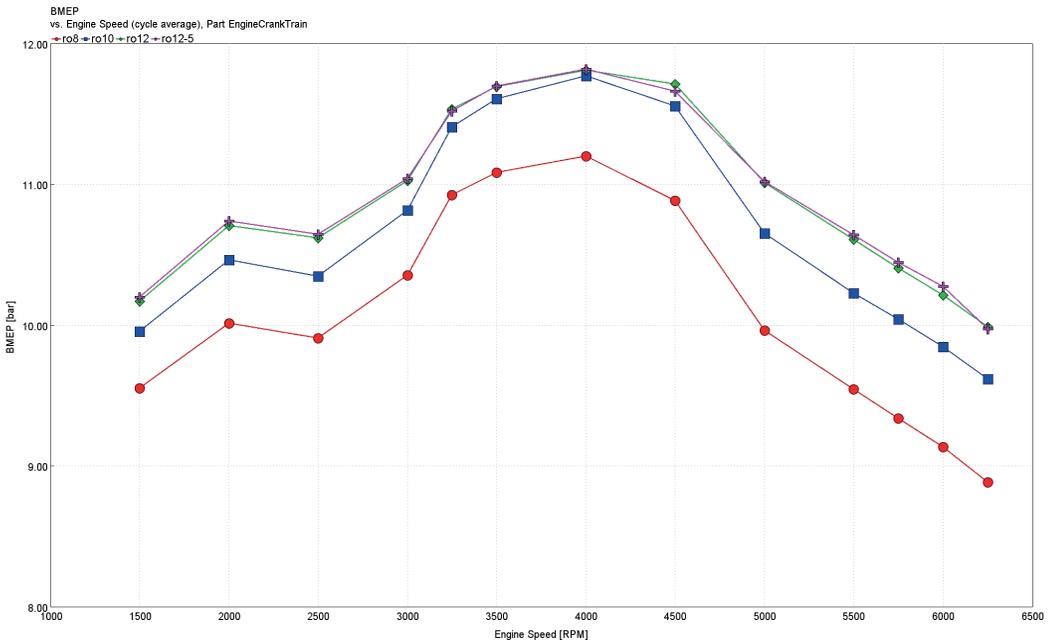
Le previsioni di prestazioni e consumi si sono rivelate sufficientemente predittive, una volta disponibili i dati sperimentali del motore dimostratore



*Confronto numerico/sperimentale di alcuni parametri motoristici rilevanti*

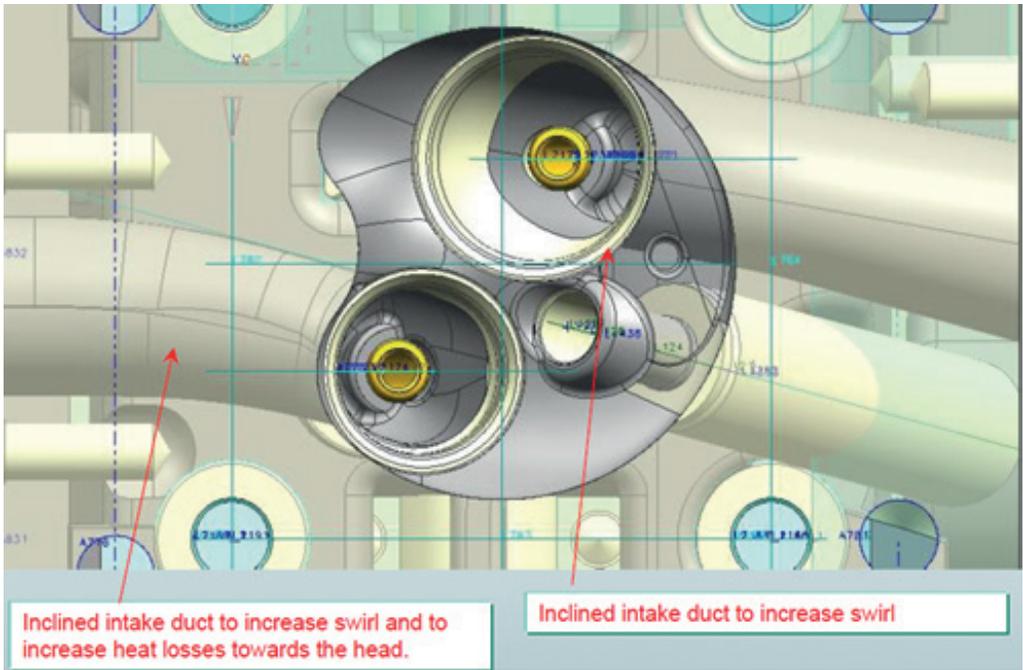
Questi modelli sono stati applicati per la definizione del rapporto di compressione ottimale. Per quanto concerne la modellistica del fenomeno di detonazione, il modello di combustione è stato accoppiato ad opportune procedure di cinetica chimica

risolte all'interno della zona di gas incombusti. Ciò ha permesso di valutare l'angolo di anticipo all'accensione o la fasatura della combustione che consente il raggiungimento della massima coppia (MBT – Minimum spark advance for Best Torque) senza incorrere nel fenomeno della detonazione. La previsione della velocità di combustione turbolenta è stata migliorata, grazie ad un approccio "bi-frattale". L'accuratezza del modello è stata altresì verificata per quanto riguarda le previsioni delle prestazioni globali a pieno carico.



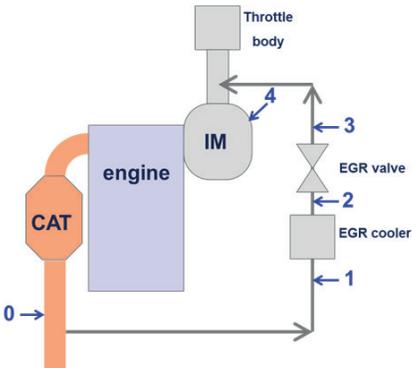
*Parametri motoristici calcolati al variare del rapporto di compressione*

A partire da questi studi è stata sviluppata l'architettura del sistema di combustione e, mediante altre attività modellistiche, del comando della distribuzione, quest'ultimo mirato alla massima efficienza volumetrica e al contenimento delle perdite organiche

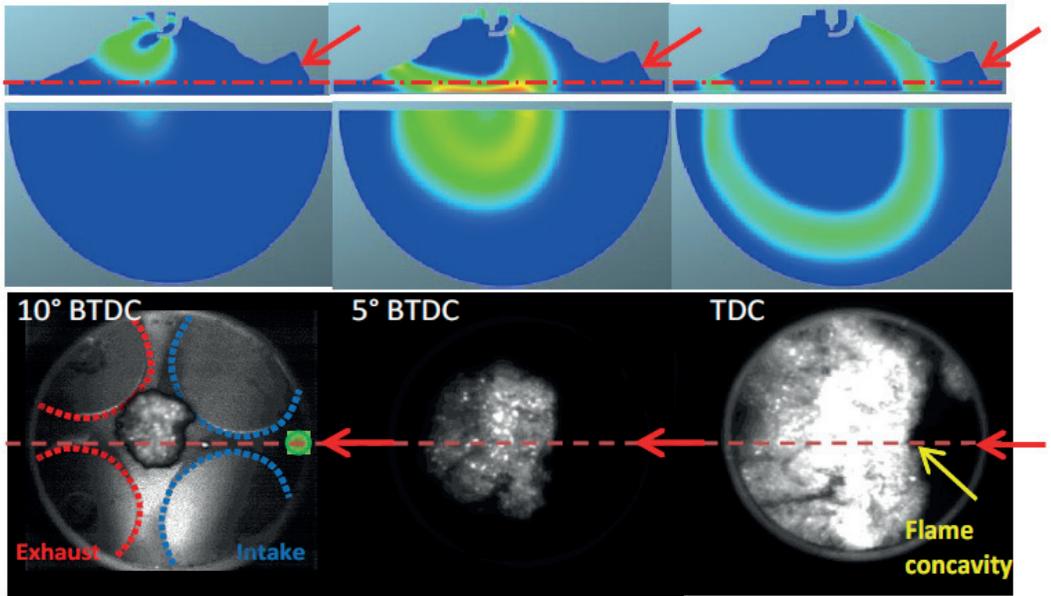


Per migliorare ulteriormente l'efficienza del motore è stato studiato un sistema di ricircolo esterno e raffreddamento dei gas di scarico (eEGR). Il sistema consente di ottimizzare la combustione e ridurre le perdite di parete.

Un contributo alle conoscenze sulla detonazione è venuto da un'attività sperimentale, svolta su un motore multi-cilindro otticamente accessibile, che ha permesso l'implementazione di un sotto-modello matematico del volume della camera di combustione non ancora raggiunto dal fronte di fiamma. Il confronto fra i risultati sperimentali e numerici mostra un buon accordo; in particolare è ben identificata l'evoluzione non sferica del fronte di fiamma con un avanzamento più lento verso la regione delle valvole di aspirazione.

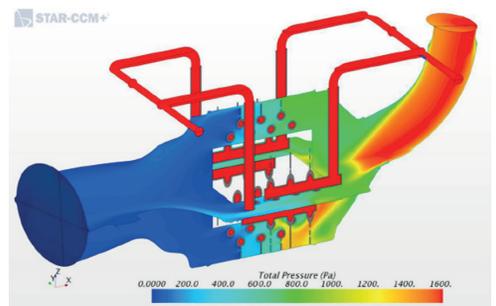


Schema di impianto eEGR



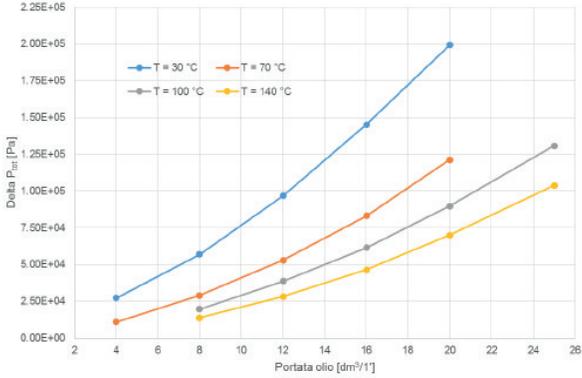
Confronto numerico sperimentale tra calcolo (evoluzione della densità superficiale di fiamma – in alto) e immagini di propagazione di fiamma (motore ad accesso ottico – in basso). La posizione dell'iniettore è evidenziata dalla freccia rossa.

Gli studi sul sistema di condizionamento dell'olio mediante i gas di scarico sono stati oggetto di diverse revisioni del sistema stesso, con l'obiettivo di contenere le perdite di carico lato olio, massimizzare l'efficienza di scambio termico e conseguire le prestazioni in termini di potenza termica rilasciata nell'olio. E' presente un dispositivo di parzializzazione dei gas di scarico che consente di regolare la temperatura dell'olio e minimizzare le perdite di carico lato gas di scarico. A seguito degli studi e delle ottimizzazioni virtuali sono stati realizzati i relativi disegni costruttivi. I risultati numerici sono stati impiegati per valutare i benefici di riduzione consumi.

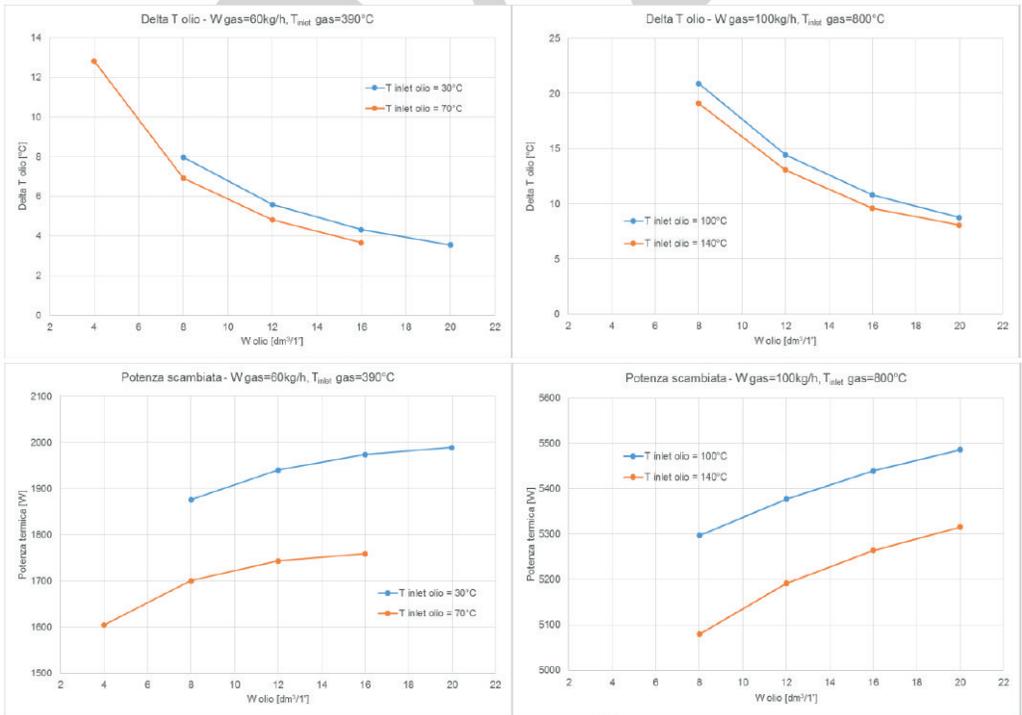


Modello termo-fluidodinamico dello scambiatore olio/gas di scarico

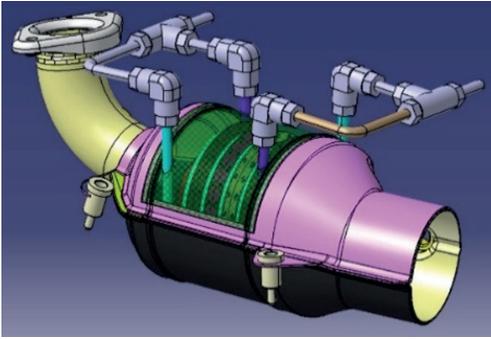
Delta P totale lato olio - Configurazione a gabbia



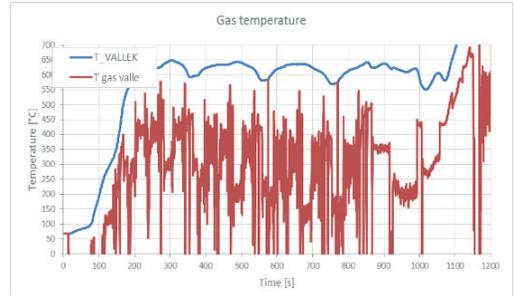
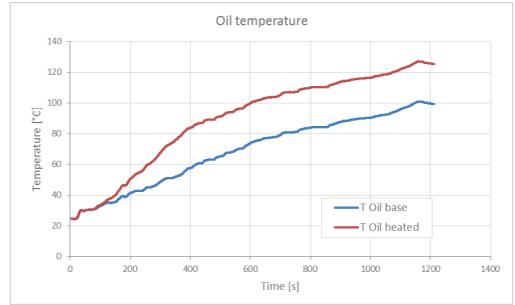
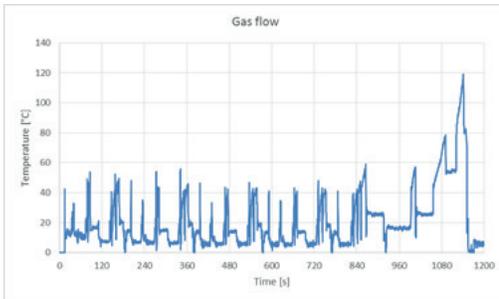
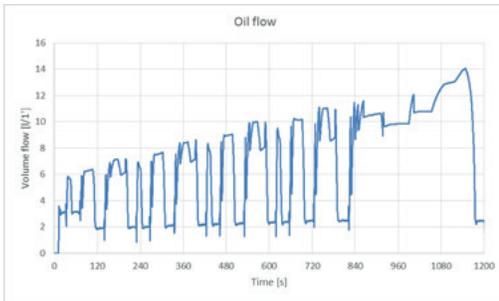
Perdita di carico lato olio calcolata per la configurazione finale



Prestazioni dello scambiatore calcolate per la configurazione finale

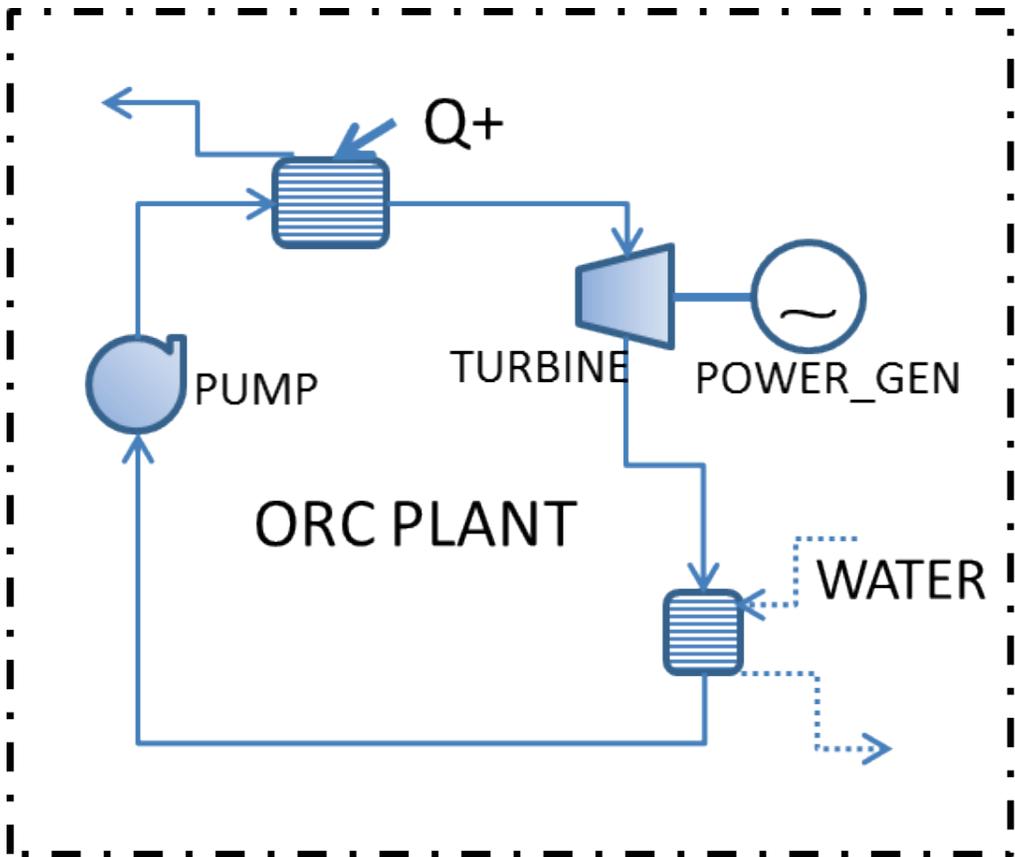


Modello CAD del complessivo scambiatore olio / gas di scarico



### Analisi dei risultati su vettura

Rimanendo sul tema del recupero dai gas di scarico, è stato studiato l'impiego dell'energia termica recuperata per la realizzazione di cicli termodinamici finalizzati alla generazione di energia elettrica mediante un sistema di tipo ORC (Organic Rankine Cycle). Sono stati sviluppati modelli termodinamici di impianti ORC operanti in regime stazionario, in grado da stimare la potenza meccanica ricavabile dai gas di scarico per diverse condizioni operative del propulsore.



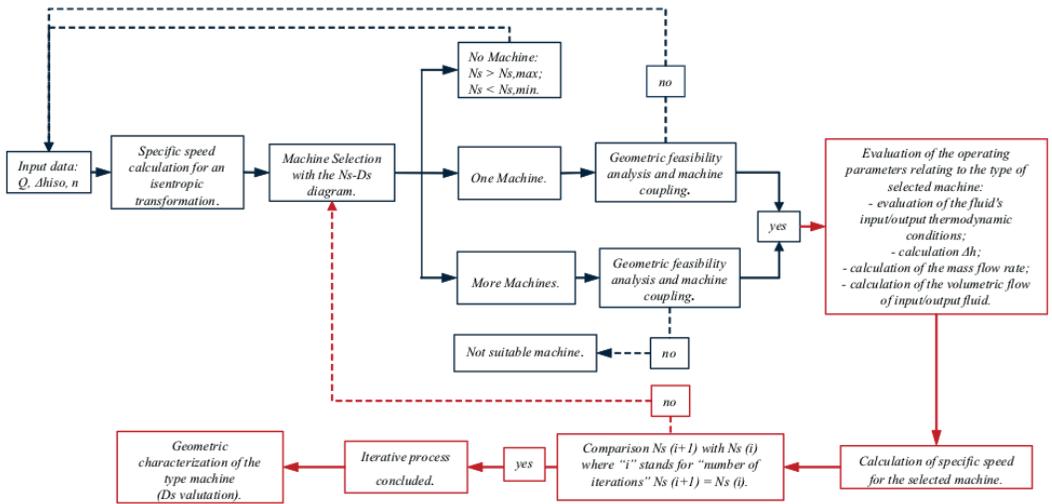
*Schema Impianto ORC per l'analisi termodinamica.*

Le metodologie sviluppate sono in grado di definire valori ottimi dei parametri del ciclo termodinamico (pressione massima, pressione minima, temperature medie di adduzione e sottrazione di calore, portata, etc.) al variare del fluido organico utilizzato: l'R245fa e l'R134a, e l'Acetone.

Algoritmi di ottimizzazione vettoriale di tipo genetico sono stati utilizzati per la definizio-

ne dei parametri operativi ottimi del ciclo termodinamico necessari al conseguimento degli obiettivi prestazionali e costruttivi: massimizzazione del rendimento globale elettrico e minimizzazione dell'area totale di scambio termico.

È stata inoltre sviluppata una procedura iterativa per la scelta di alcuni componenti dell'impianto al fine di massimizzare la potenza elettrica ottenibile dall'impianto ORC.



### Flusso logico della procedura iterativa per la scelta dell'espansore

Successivamente è stata valutata la taglia della turbomacchina e la possibilità di accoppiamento al generatore elettrico.

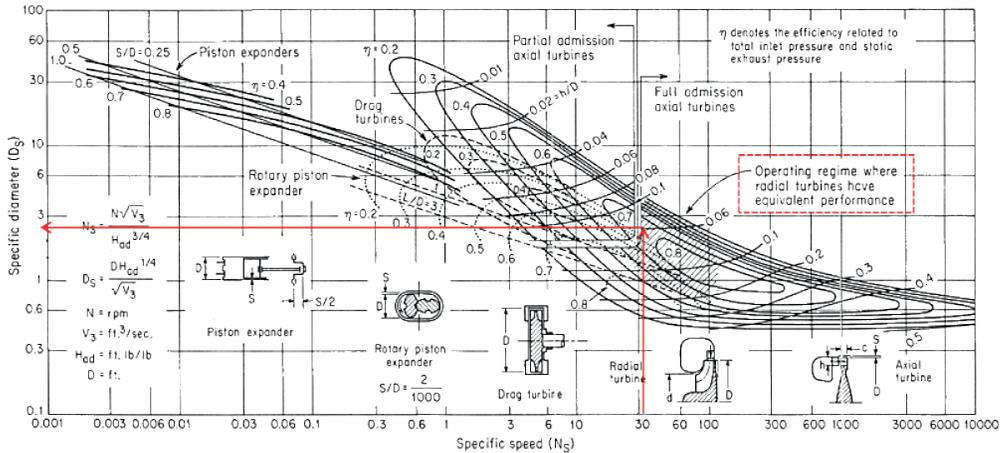
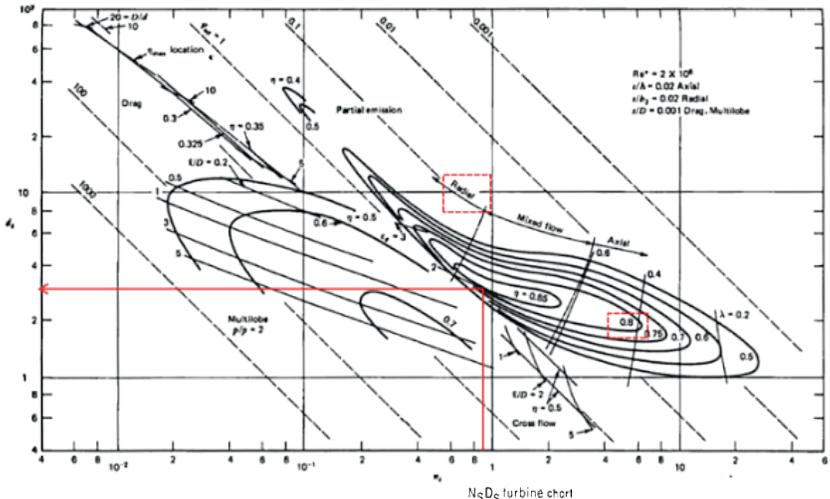
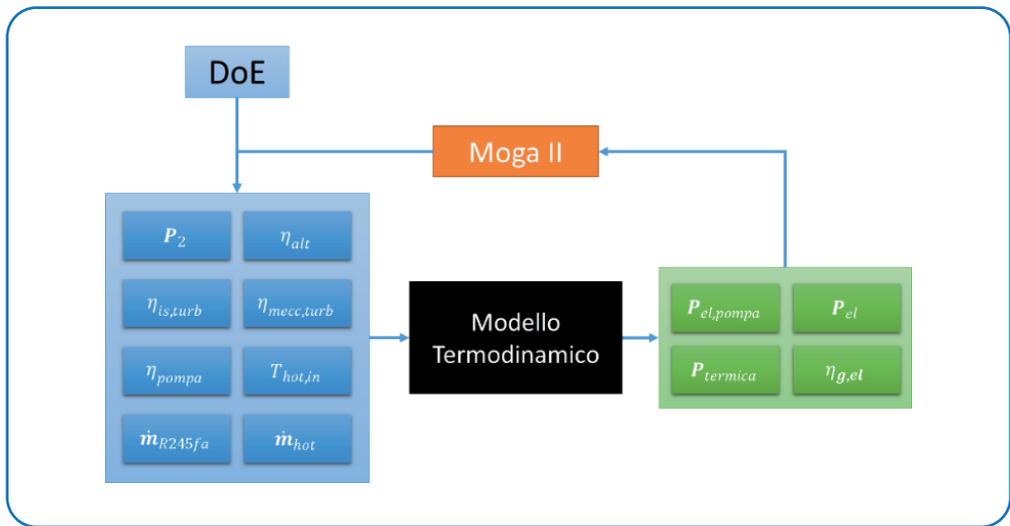


Diagramma di Balje  $N_s$ - $D_s$ : a) Soluzioni tecniche per la compressione; b) Soluzioni tecniche per l'espansione

È stato sviluppato un modello termo-fluidodinamico 0D-1D dell'impianto ORC InfinityIT10 che utilizza come fluido motore l'R245fa.

È stata utilizzata una procedura per la calibrazione del modello termodinamico basata sulla soluzione di un problema di ottimizzazione vettoriale mediante algoritmi evolutivi di tipo genetico.

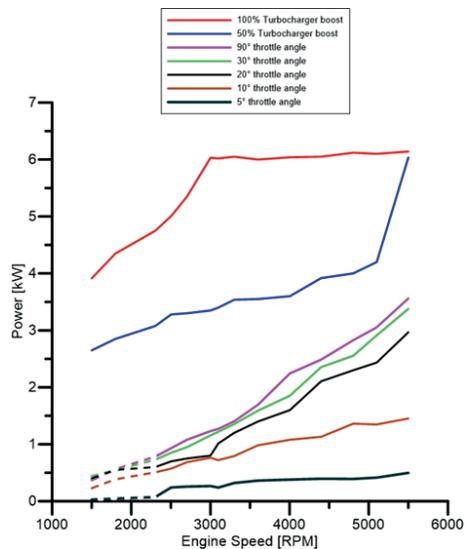


*Workflow del processo di ottimizzazione per la validazione del modello ORC.*

Per ultimo è stata effettuata l'analisi dell'accoppiamento tra un motore ed un impianto ORC alimentato mediante i gas di scarico del motore stesso.

Per quanto riguarda l'impianto ORC, si è fatto riferimento a due taglie, uno da 10 kW e l'altro da 5.5 kW di potenza elettrica nominale. A partire dal modello termo-fluidodinamico del motore è stata stimata la potenza elettrica ricavabile dall'impianto ORC.

Il sistema da 5.5 kW nominali consente generazione di potenza elettrica in tutte le condizioni di funzionamento del motore, ad eccezione di quelle caratterizzate da bassi carichi e basso regime. In particolare, la potenza erogata varia da 0.5 kW ai bassi carichi e basso numero di giri fino a 6.1 kW a pieno carico.

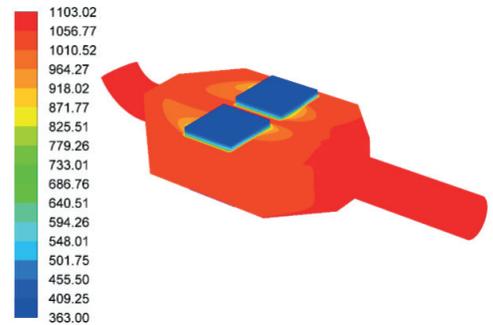


*Potenza erogata dall'impianto ORC da 5.5kW in funzione del regime di rotazione e del carico*

Nel caso dell'impianto da 10kW nominali nelle stesse condizioni di esercizio del motore la potenza erogata non supera mai i 4,5 kW a pieno carico ed elevato regime motore. Il funzionamento dell'impianto ORC risulta, inoltre, spesso instabile. Non è escluso, tuttavia, che una più approfondita indagine finalizzata alla definizione di una adeguata logica di regolazione della portata elaborata dalla pompa di alimento del sistema ORC potrebbe consentire di massimizzare lo sfruttamento della portata entalpica dei gas esausti del motore in condizione di alto carico ed in generale in tutte le condizioni di funzionamento del motore.

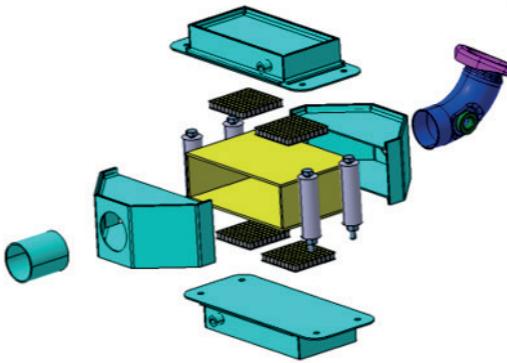
Un ulteriore studio sul recupero di energia dallo scarico ha riguardato la generazione di energia elettrica mediante celle di Seebeck. È stato sviluppato un modello di tipo stazionario in grado di stimare la potenza elettrica ricavabile dai gas di scarico tramite conversione diretta (effetto Seebeck). La conversione di energia mediante un Generatore Termoelettrico (TEG) è una tecnologia a stato solido semplice e affidabile. Questa è anche la più efficace tra i diversi processi che possono trasformare l'energia termica in energia elettrica, come per esempio quello termo-magnetico e l'effetto Nernst. È stato possibile comprendere le caratteristiche del TEG e gli effetti delle condizioni operative del motore (velocità di rotazione, carico, portata e temperatura dei gas di scarico) sul modulo termoelettrico. Un problema tipico di questa tecnologia è che le migliori prestazioni si ottengono ad alta

temperatura, il che, unitamente agli stress derivanti dai gradienti termici e dalle vibrazioni, può provocare problemi di resistenza meccanica dei materiali. Il modello utilizzato ha permesso di determinare la migliore combinazione di materiali, geometria e numero di TEGs per massimizzare l'efficienza di conversione col minimo volume e costo.



*Vista isometrica del campo termico dei componenti*

I risultati delle simulazioni hanno evidenziato la possibilità di ottenere dai TEG una potenza elettrica compresa tra 1.3 W e 1.4 W per la condizione operativa del motore a 5000 rpm, mentre a 2500 rpm la potenza stimata è compresa tra 0.3 W e 0.4 W.



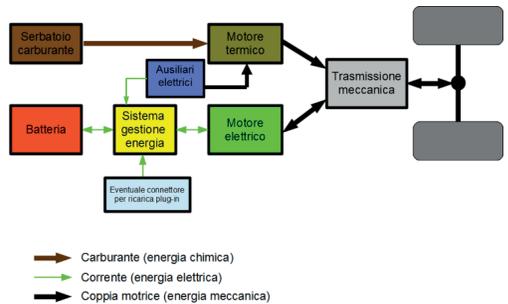
*Modello esploso del generatore a effetto Seebeck*

Per lo studio del sistema di ausiliari elettrici e per determinarne in via preliminare i vantaggi in termini di minor consumo su veicolo, si è partiti con lo studio virtuale dei dispositivi di normale utilizzo su motore, in particolare la pompa dell'olio. Preliminarmente è stata effettuata un'analisi delle perdite per azionamento. Si è proceduto all'individuazione di una strategia volta alla riduzione degli assorbimenti degli ausiliari attraverso l'ottimizzazione dei componenti stessi mediante l'adozione di procedure di calcolo numerico di tipo mono e tridimensionale. Successivamente sono state svolte attività di tipo sperimentale: la sperimentazione consente, da un lato, di verificare le prestazioni di un componente e di identificare le cause di riduzione delle efficienze, dall'altro di validare i modelli di simulazione predisposti.

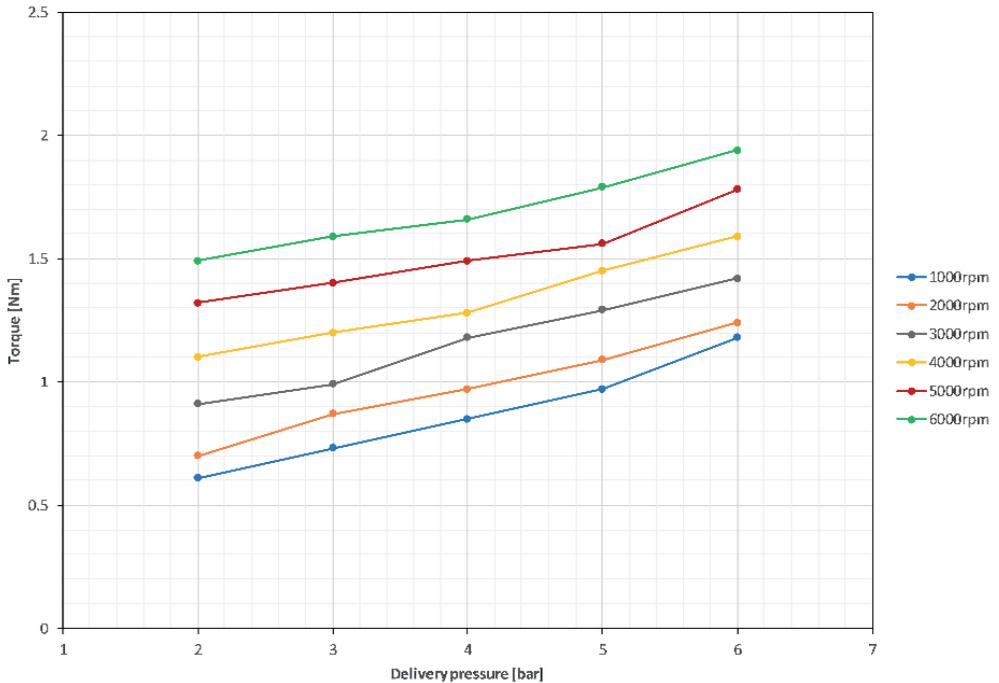
La pompa dell'olio, essendo normalmente mossa dal motore termico, viene dimensionata per bassi regimi di rotazione motore: ne

conseguisce un eccesso di portata alle alte velocità di rotazione per cui è necessario ricircolare parte della portata con conseguente perdita di efficienza. L'azionamento elettrico è quindi un'ottima strategia per la riduzione delle perdite in quanto potrebbe essere dimensionata con cilindrata inferiore e funzionare sempre in condizioni di massima efficienza.

Inoltre, in un veicolo ibrido, l'energia elettrica necessaria al suo azionamento potrebbe almeno in parte essere recuperata sfruttando l'energia cinetica del veicolo in decelerazione e frenata.



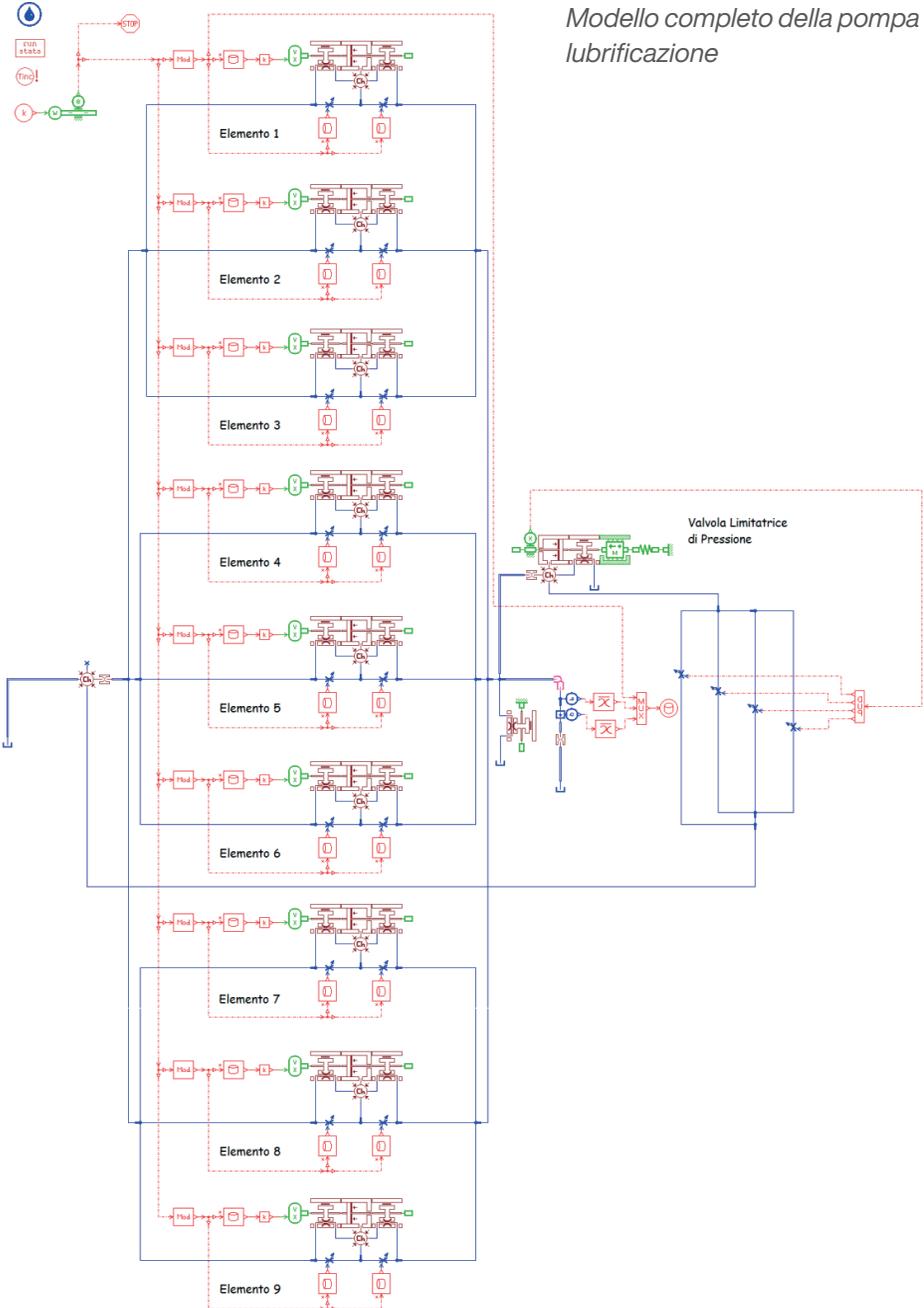
*Schema del veicolo ibrido con ausiliari elettrici*

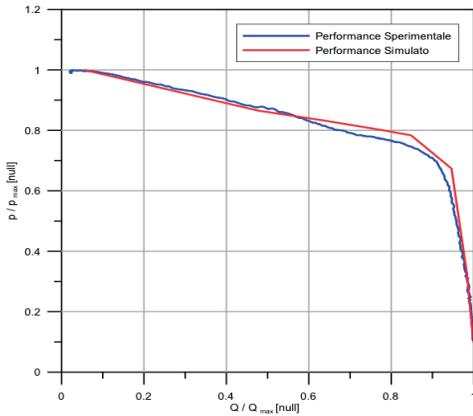


*Andamento della coppia assorbita in funzione della pressione e della velocità di rotazione*

Il circuito di lubrificazione è stato studiato utilizzando un approccio di tipo lumped parameter. Dapprima è stato creato un accurato modello dell'elemento pompa validato con i risultati sperimentali ottenuti durante la caratterizzazione della pompa stessa effettuata presso il Fluid Power lab di UniNA.

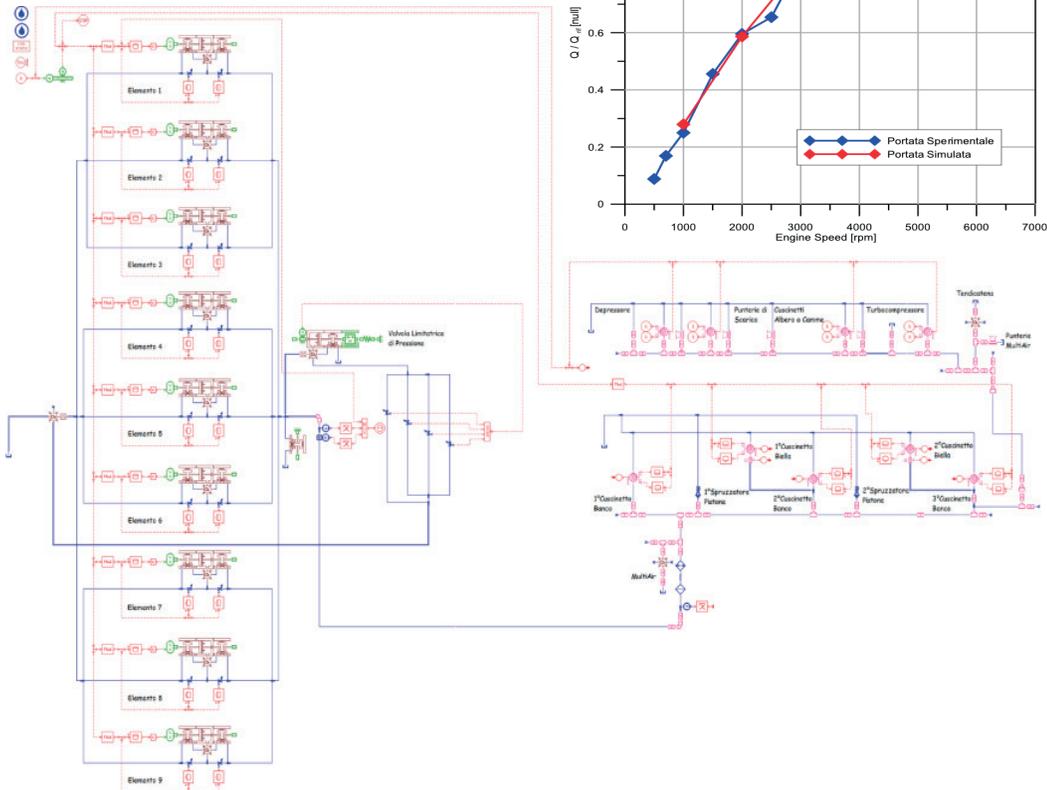
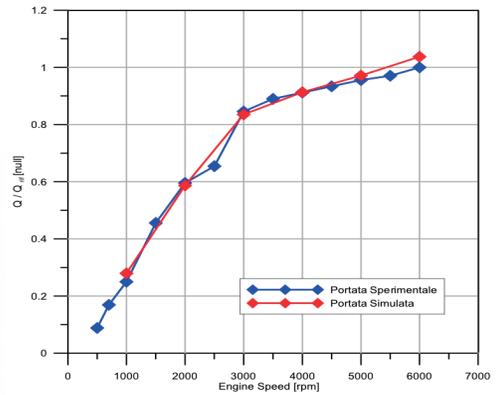
*Modello completo della pompa di lubrificazione*





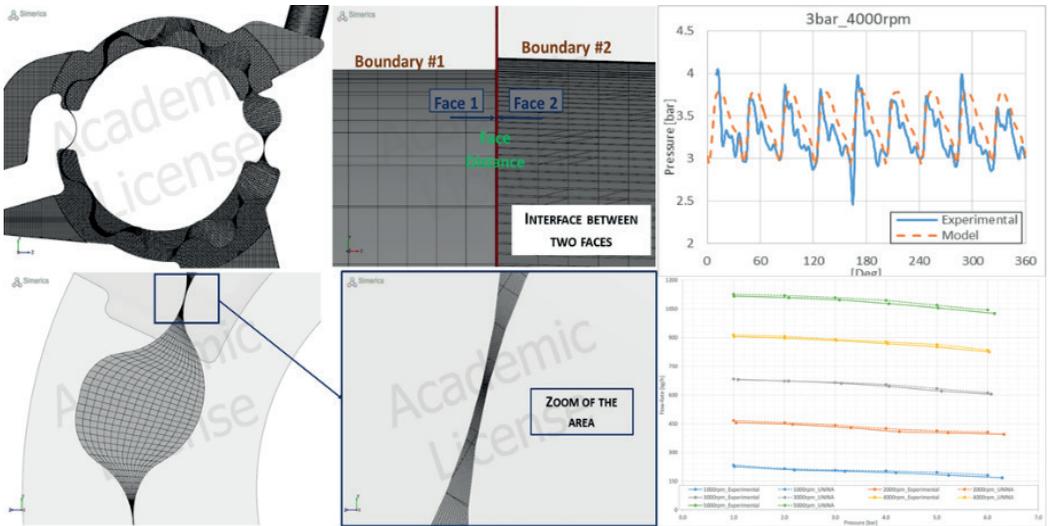
Andamento della pressione in funzione della portata a 5000 rpm e 80°C

Successivamente il modello della pompa è stato accoppiato al modello completo del circuito di lubrificazione del motore

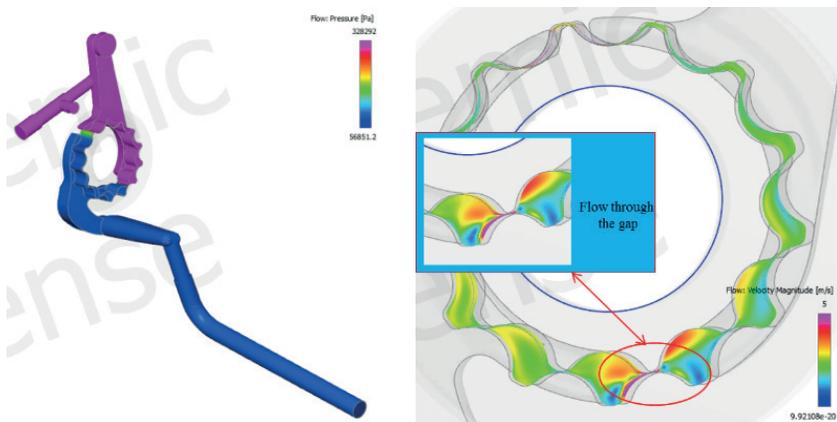


Modello completo del circuito di lubrificazione del motore e sua validazione

Un modello tri-dimensionale della pompa dell'olio è stato realizzato utilizzando un codice di simulazione numerica, per un accurato studio di dettaglio.

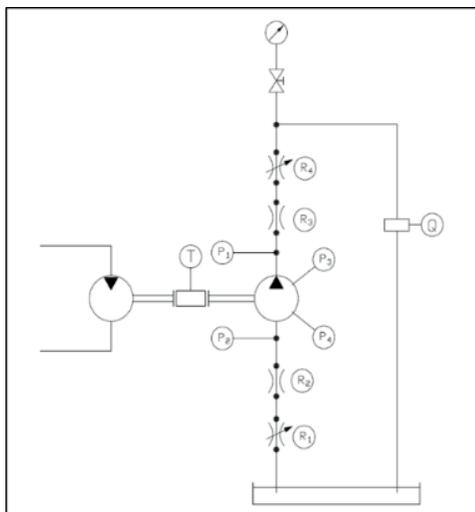


Modello di simulazione CFD 3D e validazione del modello



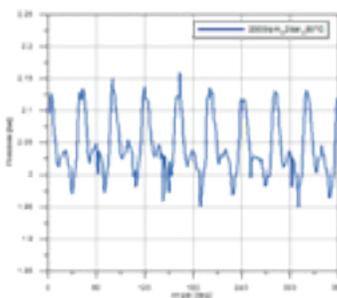
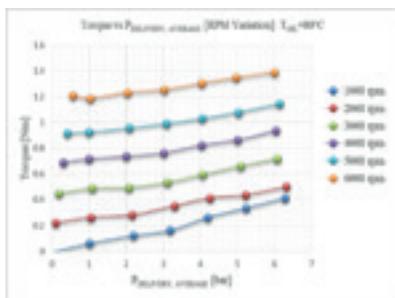
Output del modello della pompa olio

Infine i risultati degli studi modellistici sono stati validati sperimentalmente su uno specifico banco prova, appositamente riconfigurato per poter consentire di misurare la coppia assorbita dalla pompa nelle varie condizioni operative. Questa infatti è necessaria per i successivi studi di ottimizzazione e verifica dei consumi su modello matematico di veicolo ibrido



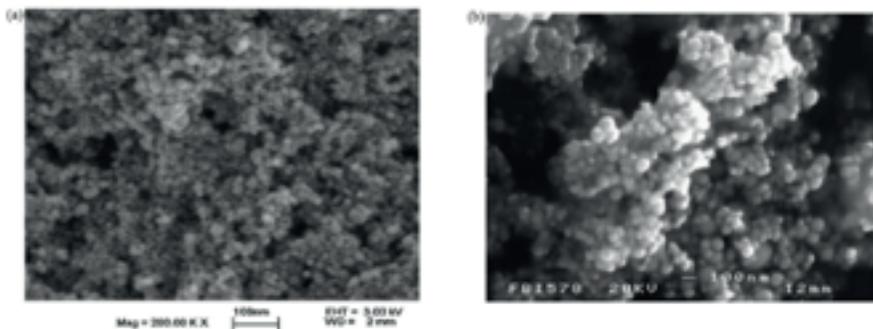
- T = Misuratore di Coppia
- P<sub>1</sub> = Sensore di pressione media mandata
- P<sub>2</sub> = Sensore di pressione media aspirazione
- P<sub>3</sub> = Sensore di pressione veloce nella camera
- P<sub>4</sub> = Sensore di pressione veloce aspirazione
- Q = Misuratore di portata
- R<sub>1</sub> = Throttle Valve aspirazione
- R<sub>2</sub> = Orifizio calibrato aspirazione
- R<sub>3</sub> = Orifizio calibrato mandata
- R<sub>4</sub> = Throttle Valve mandata

Schema del banco prova DII di UniNA



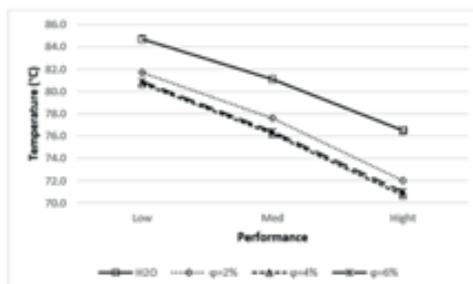
Coppia vs. Pressione di mandata a diversi valori di regime ed andamento della pressione nel vano a 2000 rpm @ 2bar, 80°C

Sul tema dell'efficienza nella gestione termica del motore sono state valutate le caratteristiche fisiche dei nanofluidi al fine di migliorare lo scambio termico. È stato dimostrato che la viscosità effettiva del nanofluido aumenta all'aumentare della frazione volumetrica di particelle e diminuisce con l'aumentare della temperatura. La conducibilità termica effettiva aumenta con l'incremento della temperatura e della frazione volumetrica mentre diminuisce con l'aumentare del diametro delle particelle. A temperatura ambiente si è visto che i modelli classici possono essere utilizzati per ricavare la conducibilità termica e la viscosità dei nanofluidi solo per frazioni volumetriche basse. La ricerca svolta dimostra che la viscosità del nanofluido svolge un ruolo chiave nel prevedere le caratteristiche del trasferimento di calore.



Campioni di nanomateriali, (sx)  $Al_2O_3$ ; (dx)  $Ni$

Il modello matematico del circuito di raffreddamento è stato preliminarmente verificato utilizzando acqua pura ad una temperatura di 20 °C. Questi risultati sono stati messi a confronto con quelli ottenuti facendo circolare il nanofluido di acqua e  $Al_2O_3$  a diverse concentrazioni volumetriche (2%, 4% e 6%). L'analisi sul circuito è stata svolta considerando 3 diversi regimi motore a coppia e condizioni termiche costanti (Low, Med, High) ed è stato possibile valutare il consumo di energia da parte della pompa di circolazione, le velocità di trasferimento di calore e le temperature in uscita dal radiatore.

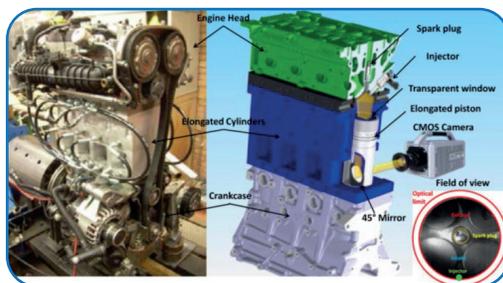
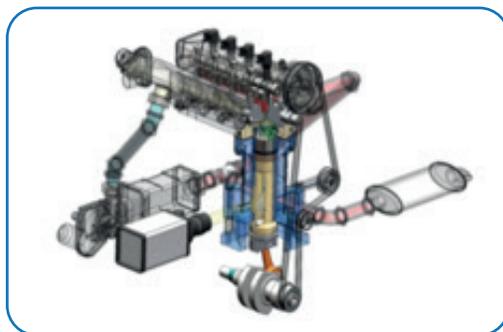


Temperatura di uscita dal radiatore per varie concentrazioni volumetriche

Le temperature in uscita al radiatore presentano un andamento decrescente all'aumentare della concentrazione volumetrica delle nanoparticelle nel fluido di base. I risultati ottenuti mostrano che la temperatura in uscita è funzione della velocità del refrigerante. I nanofluidi con una maggiore concentrazione volumetrica di nanoparticelle presentano una maggiore velocità di trasferimento del calore. Tale incremento, inoltre, è proporzionale all'aumentare del numero di Reynolds. Tuttavia, tale incremento non risulta essere considerevole per maggiori concentrazioni volumetriche di nanoparticelle rispetto a quelle del 2%.

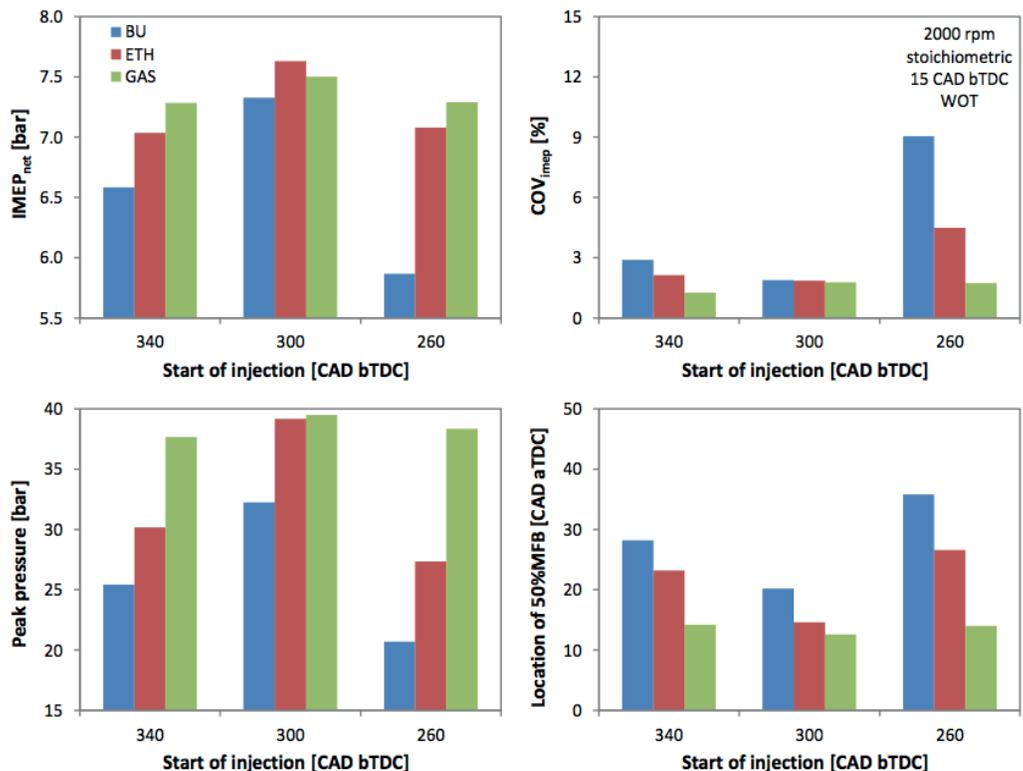
Uno dei temi di Progetto è l'alimentazione dei motori con biocombustibili. Un risultato rilevante è stata la realizzazione di una banca dati ottenuta da una intensa attività sperimentale per la valutazione dell'impatto di biocombustibili (su base alcol) e per la successiva validazione di codici numerici 1D-3D. In particolare sono stati stimati gli effetti di differenti strategie di iniezione sulla formazione della miscela, sul processo di combustione e sulla produzione ed emissione di inquinanti (NOx e particolato) al variare del combustibile (benzina, etanolo e butanolo) per diverse modalità di iniezione (diretta, indiretta e duale). Sono stati utilizzati motori da ricerca con singolo cilindro e multi-cilindrici anche otticamente accessibili cilindrate unitarie comprese tra 250 e 450 cc. Grande attenzione è stata dedicata

agli aspetti che sono complessi da ridurre o minimizzare e che richiedono un maggiore impegno dal punto di vista numerico.



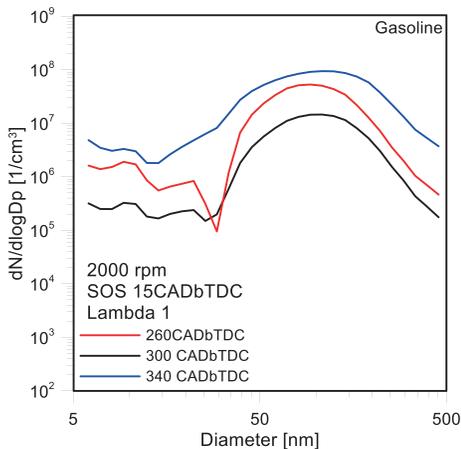
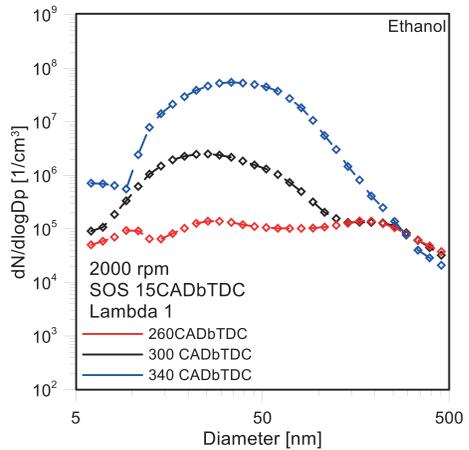
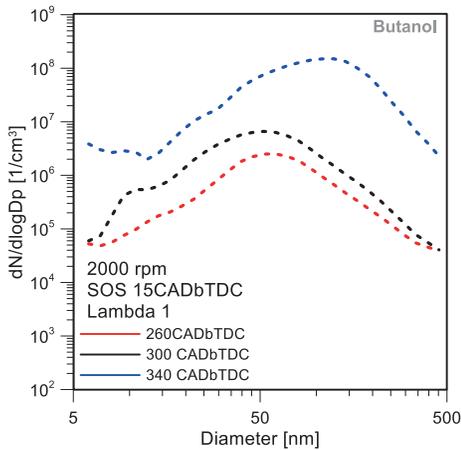
*Schema dell'apparato sperimentale utilizzato per la caratterizzazione mediante diagnostica ottica del processo di iniezione e combustione in un motore (a) a singolo cilindro e (b) pluricilindrico.*

Per ciascun combustibile (etanolo, butanolo e benzina) si sono analizzati gli effetti di tre differenti anticipi di iniezione ad anticipo di accensione fissato alla condizione ottimizzata per la benzina.



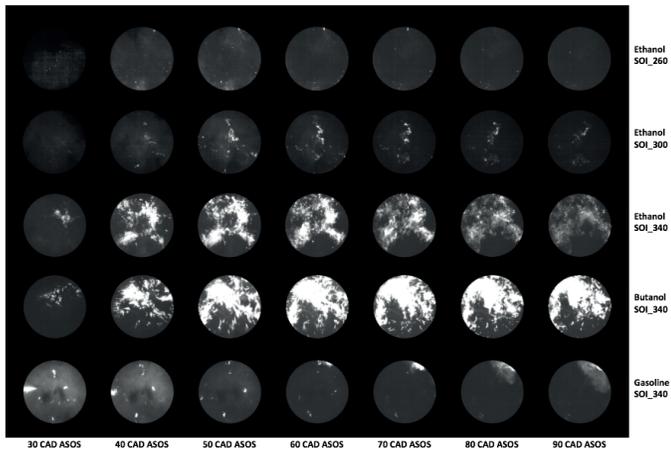
*Parametri medi delle prestazioni e della combustione in funzione dell'anticipo iniezione*

Una conclusione generale sull'influenza della natura del combustibile sembra essere la tendenza di spostamento verso diametri più piccoli per il butanolo rispetto alla benzina, e ancora di più per l'etanolo. Questo risultato può essere correlato alla dimensione delle molecole di combustibile, che determina la tendenza verso la formazione di strutture più complesse, con un diametro equivalente più grande.



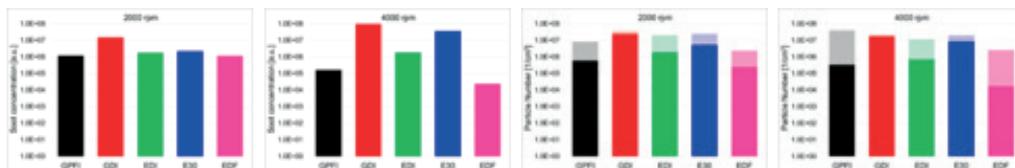
### *Distribuzione diametri delle particelle misurate allo scarico.*

L'acquisizione di immagini durante la combustione e l'inizio dell'espansione ha permesso di identificare le porzioni della camera dove si forma il particolato. Il fenomeno avviene in zone con miscela ricca (con valori di  $\lambda < 0.5$ ) e temperatura abbastanza alta per indurre la formazione. Il passaggio del fronte di fiamma in corrispondenza di regioni della superficie del pistone che presentano depositi di film liquido rappresenta la causa più probabile di attivazione del processo di formazione ed ossidazione nelle condizioni studiate. E' evidente che l'impatto dei getti sulle pareti gioca un ruolo fondamentale nella distribuzione della carica all'interno della camera di combustione.



*Esempi di evoluzione durante la fase finale di combustione.*

Nel caso specifico dell'etanolo, che si è dimostrato particolarmente vantaggioso nel bilancio prestazioni/emissioni una volta individuata la strategia di iniezione diretta ottimizzata, si è analizzato l'effetto del combustibile al variare della modalità di iniezione (diretta DI, indiretta PFI e duale DF) nel motore 250cc. Per effetto di una migliore evaporazione e conseguente miscelazione del combustibile la modalità di iniezione EDF (Etanolo dual fuel) determina una evidente riduzione della dimensione e della concentrazione massica e numerica delle particelle indipendentemente dal regime motore, che di contro invece influenza fortemente le altre strategie testate. Si può sostenere che il sistema di iniezione a doppia alimentazione permetta di sfruttare meglio le proprietà dell'etanolo, come la più facile evaporazione e il più ampio contenuto di ossigeno.



Label	PFI	DI
GPF	Gasoline	-
EDF	Gasoline	Ethanol
EDI	-	Ethanol
E30	-	Ethanol\Gasoline
GDI	-	Gasoline

*Concentrazione totale di particolato misurata in camera di combustione mediante pirometria a due colori e allo scarico*



**RICADUTE SUI  
PARTNER E SUL TERRITORIO**

## FCA Italy

- L'unità operativa "Powertrain Engineering" del Centro Tecnico di Pomigliano d'Arco è considerata centro di eccellenza – nell'ambito di FCA Italy – per i motori a benzina di piccola cilindrata, per i Sistemi di Controllo Motore e per l'NVH (Noise Vibration and Harshness), in termini di ricerca, progettazione, sperimentazione e industrializzazione
- Nel caso particolare del programma di ricerca in oggetto la sua attuazione ed il conseguente accrescimento del proprio know-how contribuirà al mantenimento di questo status
- Le conoscenze e i risultati del Progetto avranno sicuramente ricadute sui prodotti futuri; alcune soluzioni di recupero di energia potranno essere considerati in futuri programmi di sviluppo

## TECNOSISTEM S.p.A

- La partecipazione al Progetto ha consentito di accrescere conoscenze e competenze aziendali relative alla progettazione e all'ottimizzazione di dispositivi per il recupero di energia elettrica e calore dall'energia termica persa di un motore e/o di un impianto industriale;
- Le competenze sviluppate hanno contribuito alla partecipazione di Tecnosistem a 3 proposte progettuali presentate in risposta all' "Avviso per la presentazione di progetti di Ricerca Industriale e Sviluppo Sperimentale nelle 12 Aree di Specializzazione individuate dal PNR 2015-2020" nell'ambito della tema-

- tica "Mobilità sostenibile";  
L'azienda intende verificare l'applicabilità delle metodologie sviluppate nell'ambito del settore automotive anche ad altri settori industriali in cui opera, quali ad es. la progettazione di macchine per processi industriali;
- Con riferimento all'ambito tematico relativo allo sviluppo di "Metodologie innovative per la progettazione ed il testing di sistemi e componenti del veicolo" Tecnosistem negli ultimi anni ha intensificato la collaborazione con FCA, fornendo prestazioni di servizi per l'equivalente medio di 30 risorse/anno.

## Università di Napoli "Federico II"

La realizzazione del progetto ha consentito lo sviluppo di nuove competenze che hanno portato per UniNa all'istituzione, per il Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente, di un percorso "Motoristico", volto all'approfondimento delle tematiche legate al settore automotive. In tale contesto sono stati altresì istituiti due nuovi corsi denominati:

- Sistemi di Propulsione per l'autotrazione
- Modellistica e Ottimizzazione di Motori a combustione interna

Inoltre, sempre per il Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente, sono state ampliate le tematiche trattate nel Corso di Oleodinamica e Pneumatica inserendo la modellazione numerica (sia mono che tridimensionale) di componenti nel settore del Fluid Power.

Infine il modulo di "Propulsione Diesel" per il curriculum ferroviario è stato arricchito di

alcuni dei contenuti sviluppati per il progetto Green Power Train: metodologie di simulazione del motore e dei suoi componenti e procedure di calibrazione dei modelli stessi.

La finalità è quella di formare figure professionali in grado di immettersi sul mercato del lavoro avendo sviluppato uno spiccato bagaglio di conoscenze riguardanti le nuove tecnologie motoristiche ed i più moderni approcci progettistici ed analitici per tale settore.

Dagli studi effettuati è maturata un'idea originale di integrazione del Sistema ORC con il motore endotermico per la minimizzazione dei pesi e degli ingombri dei componenti aggiuntivi. Questa idea sarà oggetto di un brevetto che dovrebbe essere depositato a breve. E' stata effettuata un'analisi di anteriorità che ha mostrato l'originalità della soluzione ideata.

Le attività svolte nel progetto hanno portato allo sviluppo di metodologie e modelli teorici, proposti in alcuni lavori scientifici presentati a congressi di rilevanza nazionale ed internazionale, oltre che su riviste specialistiche del settore. Nel seguito vengono elencati i lavori ritenuti più attinenti alle tematiche del Progetto:

- Teodosio, L., De Bellis, V., Bozza, F., Fuel Economy Improvement and Knock Tendency Reduction of a Downsized Turbocharged Engine at Full Load Operations through a Low-Pressure EGR System, SAE International Journal of Engines, Vol. 8, Issue 4, pp. 1508 - 1519, 2015, doi:10.4271/2015-01-1244, ISSN: 1946-3936.
- De Bellis, V., Performance optimization of a spark-ignition turbocharged VVA engine under knock limited operation, Applied Energy, Vol. 164, pp. 162 - 174, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.097, ISSN: 0306-2619.
- Teodosio, L., De Bellis, V., Bozza, F., Tufano, D., Numerical Study of the Potential of a Variable Compression Ratio Concept Applied to a Downsized Turbocharged VVA Spark Ignition Engine, Proc. of the 13th International Conference on Engines and Vehicles (ICE2017), SAE Technical Paper 2017-24-0015, Capri, Naples, Italy, 10-14 September 2017, doi: 10.4271/2017-24-0015, ISSN: 0148-7191.
- Bozza, F., De Bellis, V., Teodosio, L., A numerical procedure for the calibration of a turbocharged spark-ignition variable valve actuation engine at part load, International Journal of Engine Research, Vol. 18, Issue 8, pp. 810-823, 2017, doi: 10.1177/1468087416674653, ISSN: 14680874.
- Bozza, F., De Bellis, V., Berni, F., D'Adamo, A. et al., Refinement of a OD Turbulence Model to Predict Tumble and Turbulent Intensity in SI Engines. Part I: 3D Analyses, Proc. of SAE World Congress 2018, SAE Technical Paper 2018-01-0850, Detroit, Michigan, USA, 10-12 April 2018, doi: 10.4271/2018-01-0850, ISSN: 0148-7191.
- Bozza, F., Teodosio, L., De Bellis, V., Fontanesi, S. et al., Refinement of a OD Turbulence Model to Predict Tumble and Turbulent Intensity in SI Engines. Part II: Model Concept, Validation and Discussion, Proc. of SAE

World Congress 2018, SAE Technical Paper 2018-01-0856, Detroit, Michigan, USA, 10-12 April 2018, doi:10.4271/2018-01-0856, ISSN: 0148-7191.

- Teodosio, L., De Bellis, V., and Bozza, F., Combined Effects of Valve Strategies, Compression Ratio, Water Injection and Cooled EGR on the Fuel Consumption of a Small Turbocharged VVA Spark-Ignition Engine, Proc. of SAE World Congress 2018, SAE Technical Paper 2018-01-0854, Detroit, Michigan, USA, 10-12 April 2018, doi:10.4271/2018-01-0854, ISSN: 0148-7191.
- Bozza, F., De Bellis, V., Teodosio, L., Tufano, D., Malfi, E., Techniques for CO<sub>2</sub> Emission Reduction over a WLTC. A Numerical Comparison of Increased Compression Ratio, Cooled EGR and Water Injection, Proc. of 2nd CO<sub>2</sub> Reduction for Transportation Systems Conference (CO<sub>2</sub> 2018), Turin, Italy, 6-8 June 2018, doi:10.4271/2018-37-0008, ISSN: 0148-7191.
- Bozza, F., Teodosio, L., De Bellis, V., Fontenesi, S., Iorio, A., A Refined 0D Turbulence Model to Predict Tumble and Turbulence in SI Engines, SAE International Journal of Engines, Vol. 12, Issue 1, pp. 15 - 30, 2019, doi: 0.4271/03-12-01-0002, ISSN: 1946-3936.
- E. Frosina, A. Senatore, D. Buono, L. Santato, 2015, "Analysis and Simulation of an Oil Lubrication Pump for Internal Combustion Engines", ASME Journal of Fluids Engineering, 137 (5), DOI 10.1115/1.4029442, ISSN 0098-2202, Scopus Code= 2 - s 2 . 0 - 8 4 9 4 4 4 4 7 5 2 1 , WOS:000353965600002
- E. Frosina, A. Senatore, D. Buono, L., Arnone, 2015, "A Critical Analysis on the Lubrication Circuit of a non-road Diesel Engine by Adop-

ting a 3D and 1D Approaches", 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Energy Procedia, 81, pp. 764 - 804, doi:10.1016/j.egypro.2015.12.086.

- E. Frosina, D. Buono, A. Senatore, K. A. Stelson, 2016, "A Mathematical Model to Analyze the Torque Caused by Fluid-Solid Interaction on a Hydraulic Valve" Journal of Fluids Engineering 138(6), doi: 10.1115/1.4032295,
- E. Frosina, D. Buono, A. Senatore, K. A. Stelson, 2016, "A modeling approach to study the fluid dynamic forces acting on the spool of a flow control valve", J. Fluids Eng 139(1), pp. 011103 - 011115, doi:10.1115/1.4034418,
- E. Frosina, A. Senatore, D. Buono, K. A. Stelson, F. Wang, B., Gao, H., 2016, "A Three-Dimensional CFD Methodology to Study Vane-Ring and Vane-Under-Vane Interactions of a Vane Pump Power Split Transmission" 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power (FPNI2016), Florianópolis, Brazil,
- M. Pellegrini, A. Vacca, E. Frosina, D. Buono, A. Senatore, 2016, "Numerical analysis and experimental validation of Gerotor pumps: A comparison between a lumped parameter and a computational fluid dynamics-based approach", Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996, 203-210, doi: 10.1177/0954406216666874,
- D. Buono, D., Siano, A. Senatore, E. Frosina, 2017, "Gerotor pump cavitation monitoring and fault diagnosis using vibration analysis through the employment of auto-regressive-moving-average technique" Simulation Modelling Practice and Theory, 71, pp. 61-82,
- Y.G. Shah, A. Vacca, S. Dabiri, E. Frosina, 2017,

- “A fast lumped parameter approach for the prediction of both aeration and cavitation in gerotor pumps”, *Meccanica*, 52 (275), pp. 1-17, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0725-y>,
- D. Siano, E. Frosina, A. Senatore, 2017, “Diagnostic Process by Using Vibrational Sensors for Monitoring Cavitation Phenomena in a Gerotor Pump Used for Automotive Applications”, *Energy Procedia* 126, pp. 1115-1122, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.269
  - Gimelli A., Muccillo M., Pennacchia O., “Study of a New Mechanical VVA System. Part II: Estimation of the Actual Fuel Consumption Improvement through 1D Fluid Dynamic Analysis and Valve Train Friction Estimation”, *International Journal of Engine Research*. DOI: 10.1177/1468087415604095. ISSN: 1468-0874.
  - Cameretti M.C., Ferrara F., Gimelli A., Tuccillo R., “Conversione Termodinamica dell'Energia Solare con Impianti ORC: Criteri di Scelta dell'Espansore e di Configurazioni di Impianto”, 3° Congresso Nazionale del Coordinamento della Meccanica Italiana, CDMI2014, Napoli, Italia, 30 giugno – 1 luglio 2014, pp. 9. ISBN: 88-902096-2-3.
  - Gimelli A., Muccillo M., Sannino R., “Ottimizzazione Multivariabile-Multiobiettivo di Sistemi Cogenerativi: Applicazione ad un'Azienda Ospedaliera. Parte A: Metodologia”. *Rivista La Termotecnica*, ISSN 0040-3725. Aprile 2015, pp. 55-58.
  - Gimelli A., Muccillo M., Sannino R., “Ottimizzazione Multivariabile-Multiobiettivo di Sistemi Cogenerativi: Applicazione ad un'Azienda Ospedaliera. Parte B: Risultati ed Analisi”. *Rivista La Termotecnica*, Maggio 2015, vol.4/2015 pp. 63-65, ISSN 0040-3725.
  - Cameretti M. C., Gimelli A., Muccillo M., Sannino R., Tuccillo R., “OFF DESIGN STUDY OF AN INTEGRATED CSP - MGT - ORC COGENERATING PLANT”, ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment, 17 – 20 May, 2015, Napoli, Italy. ISBN: 9788898273171.
  - Cameretti M.C., Ferrara F., Gimelli A., Tuccillo R., “Employing Micro-Turbine Components in integrated Solar – MGT - ORC Power Plants”, ASME Turbo Expo 2015, Palais des Congres, June 15-19 2015, Montreal (Canada). GT2015-42572. ISBN: 9780791856796. DOI: 10.1115/GT2015-42572.
  - De Bellis V., Gimelli A., Muccillo M., “Effects of Pre-Lift Intake Valve Strategies on the Performance of a DISI VVA Turbocharged Engine at Part and Full Load Operation”, *Energy Procedia*, Volume 81, December 2015, Pages 874–882. ELSEVIER. ISSN: 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.141.
  - Cameretti M.C., Ferrara F., Gimelli A., Tuccillo R., “Combined MGT – ORC solar – hybrid

- system. PART A: Plant Optimization”, *Energy Procedia*, Volume 81, December 2015, Pages 368–378. ISSN: 1876-6102. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.106.
- Cameretti M.C., Ferrara F., Gimelli A., Tuccillo R. “Combined MGT – ORC solar – hybrid system. PART B: Component Analysis and Prime Mover Selection”, *Energy Procedia*, Volume 81, December 2015, Pages 379–389. ISSN: 1876-6102. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.107.
  - Muccillo M., Gimelli A., Sannino R. “Multi-objective optimization and sensitivity analysis of a cogeneration system for a hospital facility”, *Energy Procedia*, Volume 81, December 2015, Pages 585–596. ISSN: 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.043.
  - Gimelli A., Luongo A., Muccillo M., “Efficiency and Cost Optimization of a Regenerative Organic Rankine Cycle Power Plant through the Multi-Objective Approach”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 114, 5 March 2017, Pages 601–610. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.009. ISSN: 1359-4311.
  - Gimelli A., Muccillo M., Sannino R., “Optimal Design of Modular Cogeneration Plants for Hospital Facilities and Robustness Evaluation of the Results”, *Energy Conversion and Management*, Volume 134, 15 February 2017, Pages 20–31. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.12.027. ISSN: 0196-8904.
  - Gimelli A., Muccillo M., Sannino, R., “Effects of uncertainties on the stability of the results of an optimal sized modular cogeneration plant”, *Energy Procedia*, Volume 126, 1 September 2017, Pages 369-376. ISSN: 18766102.
  - Gimelli A., Sannino R., “Thermodynamic model validation of Capstone C30 micro gas turbine”, *Energy Procedia*, Volume 126, 1 September 2017, Pages 955-962. ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.184.
  - Gimelli A., Muccillo M., “The Key Role of Advanced Mathematical Methods for the Optimal Design of Polygeneration Systems”, 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES Conference. October 4-8, 2017, Dubrovnik, Croatia. ISSN 1847-7178. Paper # 2017.0591.
  - Gimelli A., Sannino R., “A multi-variable multi-objective methodology for experimental data and thermodynamic analysis validation: An application to micro gas turbines”,

## Università della Campania “Luigi Vanvitelli”

La partecipazione del Dipartimento di Ingegneria dell’Università della Campania “Luigi Vanvitelli” al progetto ha consentito di rafforzare le competenze scientifiche dei gruppi di ricerca coinvolti sulle tematiche progettuali.

Sono state inoltre realizzate numerose pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali e contributi a congressi nazionali e internazionali. Sono state supervisionate varie tesi di laurea riguardanti gli argomenti di ricerca del progetto.

- B. Buonomo, D. Ercole, O. Manca, A. Minea, S. Nardini, *Laminar Forced Convection in Flat Tubes with Al2O3-Water Mixture for Automotive Applications*, 1st European

- Symposium on Nanofluids (ESNf2017) -10 October 2017, Lisbon, Portugal.
- B. Buonomo, A. di Pasqua, D. Ercole, O. Manca, S. Nardini, Numerical investigation on aluminum foam application in a tubular heat exchanger, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2589–2597, 2018, DOI: 10.1007/s00231-018-2305-7.
  - B. Buonomo, D. Ercole, O. Manca, S. Nardini, Numerical investigation on Nano-PCM in aluminum foam in latent thermal energy storages, paper no 56, 3rd AIGE/IIETA International Conference and 12th AIGE 2018 Conference, Reggio Calabria – Messina, 14 – 16 June 2018. Modelling, Measurement and Control B, vol. 87(3), pp. 207-212, 2018. DOI: 10.18280/mmc-b.870313.
  - B. Buonomo, A. di Pasqua, D. Ercole, O. Manca, Numerical investigation on heat exchanger in aluminum foam, 73° Congresso nazionale ATI Pisa, 12-14 Settembre 2018, *Energy Procedia*, vol. 148, pp. 782-789, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.132.
  - B. Buonomo, A. di Pasqua, D. Ercole, O. Manca, The effect of PPI on thermal parameters in compact heat exchangers with aluminum foam, 36th UIT Heat Transfer Conference, Catania, Italy, June 25-27, 2018, *Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1224, 012045, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1224/1/012045.
  - B. Buonomo, A. di Pasqua, D. Ercole, O. Manca, S. Nardini, Numerical Study on Thermal and Fluid Dynamic Behavior of a Compact Heat Exchanger Partially Filled with Metal Foam, 4th AIGE/IIETA International Conference and 13th AIGE 2019 Conference, Matera, Italy, 13-14 June 2019, *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science*, Vol. 63, No. 2-4, June, 2019, pp. 336-342 doi: 10.18280/ti-ijes.632-432.
  - B. Buonomo, A. di Pasqua, O. Manca, S. Nardini, Numerical investigation on thermoelectric generators in an exhaust automotive line with aluminium foam, 37th UIT Heat Transfer Conference, Padova, Italy, June 24-26, 2019.
  - A. Minea, B. Buonomo, J. Burggraf, D. Ercole, K. R. Karpaiya, A. Di Pasqua, G. Sekrani, J. Steffens, J. Tibaut, N. Wichmann, P. Farber, A. T. Huminic, G. Huminic, R. Mahu, O. Manca, C. Oprea, S. Poncet, J. Ravnik, Nano-Round: A benchmark study on the numerical approach in nanofluids simulation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 108, Article 104292, 2019, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104292.
  - Buonomo, A. di Pasqua, P. Ginetti, O. Manca, Pores Density Effect on a Heat Exchanger in Aluminum Foam with Flat – Tube, paper submitted to 74° Congresso Nazionale ATI, Modena, Italy, 11-13 Settembre 2019.
  - Buonomo, L. Cirillo, O. Manca, S. Nardini, Effect of nanofluids on Heat transfer enhancement in automotive cooling circuits, paper submitted to 74° Congresso Nazionale ATI, Modena, Italy, 11-13 Settembre 2019.

- B. Buonomo, A. di Pasqua, D. Ercole, O. Manca, S. Nardini, Numerical investigation on thermal and fluid dynamic behaviors of a thermoelectric generator in an exhaust automotive line with aluminium foam, paper n. IMECE2019-11575 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Salt Lake City, Utah, November 8 – 14, 2019.
- Mariani, B. Morrone, A. Unich Bottoming Organic Rankine Cycles for Passenger Cars, *Tecnica Italiana-Italian Journal of Engineering Science*, ISSN: 0040-1846, 2019, pp. 404-408, DOI: <https://doi.org/10.18280/ti-ijes.632-44>
- Mariani, B. Morrone, A. Unich Waste heat recovery from internal combustion engine by Organic Rankine Cycles, International Conference on Materials and Energy, 23-26 aprile 2019, Hammamet, Tunisia

## Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto Motori

Le attività svolte hanno permesso di realizzare un database per la calibrazione di modelli numerici e codici di simulazioni finalizzati all'ottimizzazione di motori ad a.c. da utilizzare come elemento unico del sistema propulsivo o in configurazione ibrida. Sono state inoltre definite strategie di iniezione di biocombustibili e metodologie di controllo del processo di combustione per la riduzione dell'impatto ambientale del motore. I risultati hanno anticipato le richieste, ora diventate urgenze, di una riduzione delle emissioni di particolato e di CO<sub>2</sub> oltre che l'implementazione dei rapporti prestazioni/consumi.

A valle del progetto si è quindi ulteriormente consolidata la leadership dell'IM, e quindi del CNR, nell'ambito della ricerca nel settore automotive con conseguente crescita in termini di visibilità internazionale ed attrattività per futuri progetti Europei. Inoltre, il progetto ha permesso di rafforzare il ruolo di referente per le istituzioni locali e Nazionali in termini di strategie politiche per una effettiva mobilità e sostenibilità ambientale.

- A Irimescu, L Marchitto, SS Merola, C Tornatore, G Valentino Combustion process investigations in an optically accessible DISI engine fuelled with n-butanol during part load operation. *Renewable Energy* 77, 363-376, 2015
- M.Costa, U.Sorge, P.Sementa, B.M. Vaglieco CFD Modeling of a mixed mode boosted GDI engine and performance optimization for the avoidance of knocking - pp. 21M.S. Obaidat et al. (eds.), *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing* DOI 10.1007/978-3-319-26470-7\_10 (ISBN 978-3-319-26470-7), Springer International Publishing Switzerland 2015
- F.Catapano, S.Di Iorio, A.Magno, P.Sementa, B.M. Vaglieco A comprehensive analysis of the effect of ethanol, methane and methane-hydrogen blend on the combustion process in a PFI (port fuel injection) - *Energy* 88, pp. 101-110, 2015
- S.Boccardi, F.Catapano, M.Costa, P.Sementa, U.Sorge, B.M. Vaglieco” Optimization of a gdi engine operation in the absence of knocking through numerical 1d and 3d modeling “ – *Advances in Engineering*

- Software 95, pp 38-50, 2016
- F. Catapano, S. Di Iorio, L. Luise, P. Sementa, B.M. Vaglieco Experimental Analysis of O2 Addition on Engine Performance and Exhaust Emissions from a Small Displacement SI Engine SAE Technical Paper 2016-01-0697, 2016, doi:10.4271/2016-01-0697.
  - F.Catapano, M. Costa, G. Marseglia, P. Sementa, U. Sorge, B.M.Vaglieco Gasoline spray characterization and fuel-wall interaction at different piston temperatures. SAE Technical Paper 2016-01-08532016, doi:10.4271/2016-01-0853, 2016
  - F.Catapano, P.Sementa, B.M.Vaglieco Air-fuel mixing and combustion behavior of gasoline-ethanol blends in a GDI wall-guided turbocharged multi-cylinder optical engine– Renewable Energy 96, pp 319-332, 2016
  - S Di Iorio, A. Magno, E. Mancaruso, B.M. Vaglieco Characterization of particle number and mass size distributions from a small compression ignition engine operating in diesel/methane dual fuel mode – Fuel 180, pp 613-623, 2016 .
  - M Costa, F Catapano, P Sementa, U Sorge, BM Vaglieco Mixture preparation and combustion in a GDI engine under stoichiometric or lean charge: an experimental and numerical study on an optically accessible engine, Applied Energy 180, 86-103, 2016
  - SS Merola, C Tornatore, A Irimescu, L Marchitto, G Valentino Optical diagnostics of early flame development in a DISI (direct injection spark ignition) engine fueled with n-butanol and gasoline Energy 108, 50-62, 2016
  - M Costa, U Sorge, S Merola, A Irimescu, M La Villetta, V Rocco Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission
  - Energy 117, 405-415, 2016
  - F.Catapano, P. Sementa, B.M.Vaglieco Characterization of Knock Tendency and Onset in a GDI Engine by Means of Conventional Measurements and a Non-Conventional Flame Dynamics Optical Analysis, SAE Int. J. Engines 10(5) PP.2439-2450, 2017
  - F.Catapano, P. Sementa, B.M.Vaglieco Characterization of Knock Tendency and Onset in a GDI Engine by Means of Conventional Measurements and a Non-Conventional Flame Dynamics Optical Analysis, SAE Int. J. Engines 10(5) PP.2439-2450, 2017.

- A.Irimescu, S. Di Iorio, S. Merola, P. Sementa, B.M.Vaglieco On the Entrainment Velocity and Characteristic Length Scales Used for Quasi-Dimensional Turbulent Combustion Modeling in Spark Ignition Engines, SAE Technical Paper 2017-24-0002, 2017
- R Amirante, E Distaso, S Di Iorio, P Sementa, P Tamburrano, BM Vaglieco Effects of natural gas composition on performance and regulated, greenhouse gas and particulate emissions in spark-ignition engines Energy Conversion and Management 143, 338-347,2017
- S Di Iorio, A Magno, E Mancaruso, BM Vaglieco Analysis of the effects of diesel-/methane dual fuel combustion on nitrogen oxides and particle formation through optical investigation in a real engine Fuel Processing Technology 159, 200-210, 2017
- SS Merola, S Di Iorio, A Irimescu, P Sementa, BM Vaglieco Spectroscopic characterization of energy transfer and thermal conditions of the flame kernel in a spark ignition engine fueled with methane and hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy 42 (18), 13276-13288,2017
- R Amirante, E Distaso, M Napolitano, P Tamburrano, SD Iorio, P Sementa, BM Vaglieco Effects of lubricant oil on particulate emissions from port-fuel and direct-injection spark-ignition engines International Journal of Engine Research, pp. 951-970, Vol 18, Issue 5-6, 2017
- A.Irimescu, S. Di Iorio, S. Merola, P. Sementa, BM Vaglieco Correlation between Simulated Volume Fraction Burned Using a Quasi-Dimensional Model and Flame Area Measured in an Optically Accessible SI Engine," SAE Technical Paper 2017-01-0545, 2017
- F.Catapano, S.Di Iorio, L.Luise, P. Sementa, BM Vaglieco In-Cylinder Soot Formation and Exhaust Particle Emissions in a Small Displacement Spark Ignition Engine Operating with Ethanol Mixed and Dual Fueled with Gasoline," SAE Technical Paper 2017-01-0653, 2017
- G Marseglia, M Costa, F Catapano, P Sementa, BM Vaglieco Study about the link between injection strategy and knock onset in an optically accessible multi-cylinder GDI engine, Energy Conversion and Management 134, pp 1-19, 2017,
- S.S.Merola,, A.Irimescu, S. Di Iorio, BM Vaglieco Effect of Fuel Injection Strategy on the Carbonaceous Structure Formation and Nanoparticle Emission in a DISI Engine Fuelled with Butanol Energies 2017, 10, 832; doi:10.3390/en10070832
- F Catapano, S.D Iorio, P Sementa, BM Vaglieco, Optimization of the compressed natural gas direct injection in a small research spark ignition engine International Journal of Engine Research 18 (1-2), pp.118-130, 2017



- A. Irimescu, S.S. Merola, S. Di Iorio, B.M. Vaglieco Investigation on the effects of butanol and ethanol fueling on combustion and PM emissions in an optically accessible DISI engine, *Fuel*, Vol.216, , pp 121-14115, 2018
- A. Montanaro, M. Costa, U. Sorge, L. Allocca, 2015, "GDI Spray-Wall Interaction with Numerical Characterization: Wall Temperature Influence," SAE Technical Paper 2015-01-0917, 2015, doi:10.4271/2015-01-091
- L. Allocca, M. Costa, A. Montanaro, U. Sorge, 2015, "GDI spray impact characterization by optical techniques for the assessment of 3D numerical models" - *New Developments in Mechanics and Mechanical Engineering*, pagg. 42-51, 2015, ISBN 978-1-61804-288-0

- L. Marchitto, D. Hampai, S.B. Dabagov, L. Allocca, S. Alfuso, C. Polese, A. Liedl, 2015, “GDI spray structure analysis by polycapillary X-ray -tomography”, International Journal of Multiphase Flow 70 (2015), pp.15-21, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.015
- A. Montanaro, L. Allocca, M. Costa, U. Sorge, 2016, “Assessment of a 3D CFD model for GDI spray impact against wall through experiments based on different optical techniques” International Journal of Multiphase Flow 84 (2016) 204–216, Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.05.007>



POR CAMPANIA FESR 2014/2020 ASSE 1 O.S. 11. Az 1.2.2



