

RIFLESSIONI SUL FUTURO DEL MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA

Guido Saccone

Riassunto

Questo articolo esplora l'evoluzione futura dei motori a combustione interna (ICE), fonti cruciali di energia che attualmente forniscono il 25% dell'energia mondiale, contribuendo nel contempo al 10% delle emissioni globali di gas serra. Nonostante i progressi innovativi, serie preoccupazioni legate alle emissioni hanno indotto a riflettere sulla sostenibilità a lungo termine dei motori ICE. La nota propone una valutazione critica dei fattori che potrebbero influenzare il futuro dei motori ICE, come il ruolo dell'energia accessibile nello sviluppo globale, la vasta dipendenza dei motori ICE nell'infrastruttura dei trasporti e il notevole ridimensionamento dell'inquinamento recentemente conseguito dalla tecnologia dei motori ICE. Si affrontano le sfide poste dalle tecnologie alternative, in particolare dai veicoli elettrici, riconoscendone i limiti e la prevalenza attuale dei combustibili fossili nell'approvvigionamento globale di energia. Inoltre, l'articolo affronta la politicizzazione delle preoccupazioni sul cambiamento climatico legate ai motori ICE e sostiene la necessità di direttive governative informate e basate su valutazioni tecniche per facilitare una transizione realistica verso sistemi energetici sostenibili. Nonostante le sfide, la maggior parte degli ingegneri automobilistici esprime ottimismo riguardo all'importanza ancora oggi valida dei motori ICE nel soddisfare le esigenze globali di mobilità e generazione di energia. L'articolo si conclude prevedendo un futuro caratterizzato da una varietà di soluzioni, tra cui motori ICE, powertrain a batteria ed ibridi. Questo approccio multiforme è considerato essenziale per affrontare le complessità delle transizioni energetiche e garantire un futuro sostenibile per la società.

Abstract

This article explores the future evolution of internal combustion engines (ICE), crucial sources of energy that currently provide 25% of global energy while contributing to 10% of global greenhouse gas emissions. Despite innovative progress, serious concerns related to emissions have led to reflections on the long-term sustainability of ICE engines. The note provides a critical assessment of factors that could influence the future of ICE engines, such as the role of accessible energy in global development, the extensive dependence of ICE engines in transportation infrastructure, and the significant reduction in pollution achieved by ICE engine technology. The challenges posed by alternative technologies, particularly electric vehicles, are addressed, recognizing their limitations and the current prevalence of fossil fuels in global energy supply. Additionally, the article addresses the politicization of climate change concerns related to ICE engines and advocates for the need for well-informed government policies based on technical assessments to facilitate a realistic transition to sustainable energy systems. Despite the challenges, most automotive engineers express optimism regarding the continued importance of ICE engines in meeting global mobility and energy generation needs. The article concludes by envisioning a future characterized by a variety of solutions, including ICE engines, battery powertrains, and hybrids. This multifaceted approach is considered essential to address the complexities of energy transitions and ensure a sustainable future for society.

Parole chiave: *Combustione, Motore a combustione interna, Carburanti, Emissioni zero, Ecosostenibilità, Ricerca.*

Keywords: *Combustion, Internal Combustion Engine, Fuels, Zero Emissions, Sustainability, Research.*

1. Introduzione

La combustione è stato il primo processo chimico-fisico che l'umanità ha imparato a controllare e a sfruttare per i suoi peculiari scopi [1]. Infatti, la scoperta del fuoco o, meglio, l'invenzione dei metodi per innescare la combustione e mantenere accesa una fiamma affondano le origini nella lontana preistoria e sono materia di innumerevoli miti e leggende appartenenti a praticamente tutte le civiltà umane [2].

Il graduale miglioramento delle tecnologie della combustione è stato per lungo tempo la forza spingente del progresso tecnico-scientifico dell'umanità che ha trovato il suo momento di massimo impulso durante la Prima Rivoluzione Industriale con la formulazione delle leggi della termodinamica che hanno spianato l'avvento dell'odierna società ipertecnologica.

Nell'arco di circa due secoli e mezzo la civiltà occidentale, in prevalenza, ha sfruttato gran parte delle risorse energetiche del nostro pianeta accumulate nel

corso delle ere geologiche passate e immagazzinate nei depositi di carbone, petrolio e gas naturale presenti nei giacimenti sotterranei o sottomarini sparsi in varie regioni del globo terracqueo e da noi attualmente identificate come risorse fossili.

Sebbene le Rivoluzioni Industriali abbiano generato un considerevole progresso ed un generalizzato miglioramento sociale, economico, culturale e scientifico, ciò non è avvenuto senza gravi conseguenze climatiche e ambientali. Infatti, i prodotti della combustione, essenzialmente il biossido di carbonio, ma anche molte altre sostanze tossiche, inquinanti e in alcuni casi cancerogeno come il benzene, degli idrocarburi quali sono da un punto di vista chimico i combustibili fossili, si sono accumulati in quantità sempre più ingenti nell'atmosfera terrestre e più in generale nel nostro complesso e interconnesso ecosistema planetario. Ciò ha causato in maniera indiretta un'alterazione sempre più consistente dei delicati equilibri del clima della Terra innescando un crescente effetto serra, con conseguente riscaldamento globale, oltre ad aver danneggiato direttamente la salute delle persone che li hanno inalati o che sono venuti a contatto con essi.

Tuttavia, nonostante l'attenzione sempre più stringente alle problematiche ambientali e di ecosostenibilità, i processi di combustione sono ancora oggi imprescindibili in molteplici settori di attività della nostra odierna società, ad esempio, da quello industriale e manifatturiero a quello dei trasporti su strada, e ancor di più marittimi, aerei e spaziali. Si prevede, inoltre, che la combustione continuerà a rivestire un ruolo preminente ancora nei prossimi decenni.

Risulta chiaro però che in un futuro sempre più prossimo le tecnologie della combustione non potranno esimersi dall'assecondare con responsabilità e lungimiranza alcuni importanti vincoli quali: l'aumento dell'efficienza energetica ovvero la produzione di lavoro meccanico con il consumo di aliquote sempre più basse di combustibile, la riduzione delle emissioni inquinanti e clima-alteranti e il miglioramento dei requisiti di sicurezza.

I motori a combustione interna (ICE) che elaborano combustibile fossile forniscono circa il 25% della potenza mondiale ~3000 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio all'anno, su un totale di ~13.000 milioni [3] (Figura 1).

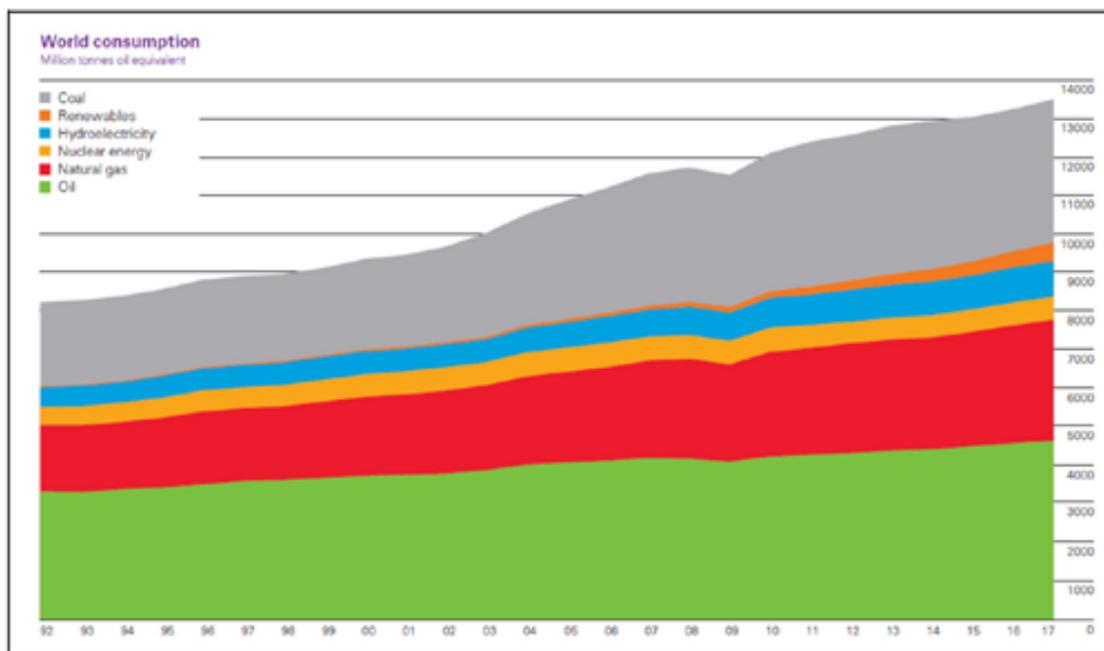


Fig. 1. Consumo mondiale di energia per sorgenti in milioni di barili di petrolio equivalente negli ultimi 25 anni. Circa il 70% del petrolio (ovvero circa 3000 milioni tonnellate equivalenti) è consumato dagli ICE [3].

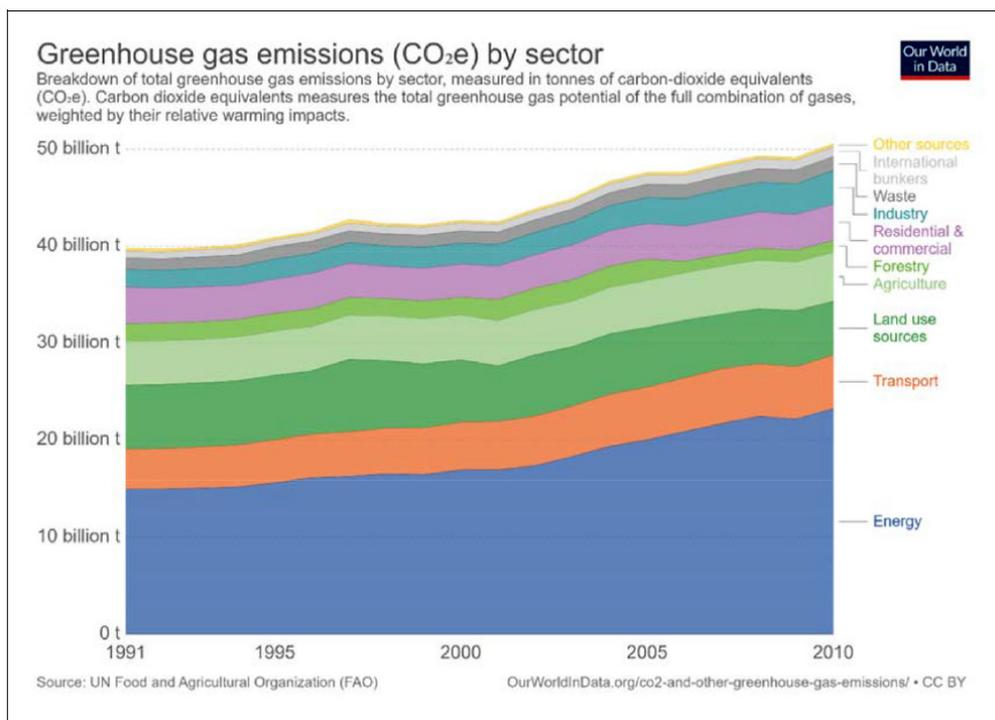


Fig. 2. Potenziale per il riscaldamento globale in tonnellate equivalenti di CO₂ per settore. Il contributo di quello dei trasporti è di circa il 10% [4].

Tuttavia, durante il loro funzionamento, producono circa il 10% delle emissioni globali di gas serra (GHG) (Figura 2).

Negli ultimi decenni, la riduzione dei consumi di carburante, il parallelo aumento dell'efficienza propulsiva e la drastica diminuzione delle emissioni sono stati gli obiettivi principali di ricercatori e produttori di motori e significativi progressi sono stati compiuti rendendo l'attuale motore ICE quasi una "meraviglia tecnologica".

Ciò nonostante, in risposta alle crescenti problematiche ambientali, sono state avanzate importanti proposte tramutate poi in direttive atte a sostituire i motori ICE con sistemi di propulsione elettrici, con l'obiettivo di ridurre ulteriormente le emissioni di GHG di automobili e altri mezzi di trasporto.

Considerando che la maturità della tecnologia del motore ICE è qualcosa che molte altre tecnologie non possiedono, è anche necessario valutare il potenziale per progressi futuri, nonché stabilire i benefici offerti dalle tecnologie concorrenti, al fine di formulare raccomandazioni responsabili per un avvenire ecosostenibile e al tempo stesso realistico.

I fattori che con ogni probabilità influenzeranno tale futuro sono discussi in questa nota e includono:

- La constatazione che l'energia accessibile è sta-

ta determinante nell'aumentare drasticamente lo standard di vita nel mondo, in particolare nei paesi poveri, e l'osservazione che finora nella storia dell'umanità, la combustione di carburanti fossili o derivati da biomassa è stata praticamente l'unica fonte affidabile di energia;

- La constatazione che l'intero pianeta è collegato da un'imponente infrastruttura di trasporto basata principalmente sul motore ICE e che la sua sostituzione richiederebbe decenni ed enormi investimenti economici;
- I notevoli progressi nella tecnologia del motore ICE che hanno abbassato i livelli di inquinanti di un fattore 1000 nei decenni passati e che ora rendono le emissioni di particolato derivanti dall'usura di pneumatici e freni un problema più rilevante rispetto alle emissioni del motore (problema presente sia nei veicoli a motore a combustione interna che nei veicoli elettrici);
- Gli ostacoli ancora affrontati dalle alternative proposte, come i veicoli elettrici alimentati da batterie, che presentano notevoli limitazioni in termini di costo, peso e altri aspetti, e che si spera possano essere alimentati da fonti rinnovabili, come eolico e solare, che

attualmente rappresentano solo una frazione minima dell'approvvigionamento energetico mondiale;

- L'osservazione che le preoccupazioni sull'impatto dei motori ICE sul cambiamento climatico sono diventate politicizzate, anche se devono essere valutate in modo imparziale. Si rileva la necessità di politiche governative informate, basate su dati scientifici, che promuovano una transizione energetica realistica verso sistemi sempre più sostenibili per l'ambiente.

Certamente, esplorare nuove tecnologie e motori concorrenti, così come nuovi carburanti, è importante per un futuro ragionevole per il nostro pianeta.

2. Il motore a combustione interna

Il trasporto di merci e persone è essenziale per la società moderna, e attualmente questo settore è quasi interamente alimentato da motori a combustione interna che utilizzano carburanti liquidi a causa della loro abbondante disponibilità, convenienza e accessibilità economica. Inoltre, i motori a combustione stazionari (ad esempio generatori) sono onnipresenti nelle nostre industrie e negli impianti di generazione di energia, che contribuiscono anche allo standard di vita mondiale. Infatti, la domanda di energia disponibile e conveniente sta aumentando con l'aumento della popolazione globale e della prosperità, in particolare nei paesi in via di sviluppo.

È importante notare che non esistono ancora alternative reali che possano competere con il motore a combustione interna su tutta la gamma di applicazioni e che, anche oggi, i motori a combustione interna sono oggetto di un continuo miglioramento.

Questi sviluppi rendono ancora più difficile per le tecnologie concorrenti ottenere vantaggi sul motore a combustione interna. Concentrandoci sul trasporto, la domanda di energia è molto elevata. Si stima che nel mondo siano in circolazione ~1,2 miliardi di veicoli leggeri e ~380 milioni di veicoli pesanti, e questi numeri sono in continuo aumento [4]. Per cui, la domanda giornaliera di carburanti liquidi supera gli ~11 miliardi di litri, ovvero 23.000 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio all'anno (Figura 1) [3].

Tutte le alternative rispetto ai motori a combustione interna alimentati da combustibili fossili, affrontano ostacoli molto significativi per una rapida adozione. Tuttavia, caratterizzazioni scorrette della combustione hanno portato a credere in molti settori che la morte del motore a combustione interna sia auspicabile e imminente.

Ampi margini per ulteriori miglioramenti nei motori ICE ancora sussistono con progressi nelle tecnologie di combustione, specialmente in combinazione con l'elettrificazione. Questo è stato riconosciuto dai principali produttori di apparecchiature, ad esempio, dalla Toyota S.p.A. che ha rilasciato pubblicamente molti dei suoi brevetti al fine di rendere quanto più accessibili a molteplici produttori le tecnologie ibride, che si ritiene incoraggeranno la fabbricazione di veicoli, inclusi gli ibridi con motori a combustione interna, gli ibridi *plug-in*, quelli con celle a combustibile e persino veicoli completamente elettrici.

3. Emissioni e ambiente

Nel corso della storia del motore a combustione interna e decenni prima che le preoccupazioni sul cambiamento climatico diventassero preminenti, i ricercatori hanno investito molti sforzi per migliorarne l'efficienza di combustione, ridurre le emissioni inquinanti e i costi operativi, e garantire l'uso ottimale delle risorse finite di carburante per le generazioni attuali e future. Negli ultimi quattro decenni, in risposta alle crescenti preoccupazioni sulla qualità dell'aria, la ricerca sulla combustione del motore, il post-trattamento dei gas di scarico e i controlli hanno portato a una riduzione di 1000 volte delle pericolose emissioni di scarico (particolato, NO_x, CO e idrocarburi incombusti).

Molti progressi in queste aree sono stati documentati da articoli tecnici pubblicati su svariate riviste di settore [5]. Recentemente, tuttavia, crescenti preoccupazioni sulla qualità dell'aria e sull'impatto delle emissioni di gas serra sul riscaldamento globale hanno iniziato a guidare politiche locali, nazionali e internazionali. Diverse iniziative chiedono cambiamenti drastici, e l'elettrificazione dei veicoli è fortemente promossa. Ad esempio, il *C40 Cities Climate Leadership Group*, un gruppo di 90 città del mondo che rappresenta più di 650 milioni di persone e un quarto dell'economia globale, si concentra sull'azione urbana per ridurre le emissioni di gas serra e i rischi climatici. Le richieste includono l'eliminazione dei motori a combustione interna dal trasporto urbano e l'uso di energia eolica e solare come fonti primarie.

Tuttavia, come mostrato nella Figura 1, l'energia eolica e solare forniscono solo una piccola frazione delle attuali esigenze energetiche. Nonostante i progressi tecnici e la riduzione dei costi per l'energia eolica e solare, sembra molto improbabile che la maggior parte delle fonti energetiche fossili verrà sostituita da alternative neutre dal punto di vista del carbonio nei prossimi due o tre decenni. L'indipendenza energetica

e la sicurezza energetica giocano un ruolo importante nella determinazione delle politiche in molti paesi. Le preoccupazioni climatiche devono essere bilanciate dall'osservazione che, secondo tutti gli indicatori/parametri oggettivi ed empirici dello sviluppo umano (ad esempio livelli di povertà assoluta, aspettativa di vita, percentuale della popolazione mondiale che è denutrita, istruzione, ecc.) il mondo è migliorato costantemente, specialmente nei paesi più poveri, nei decenni passati grazie alla disponibilità di energia accessibile e, in particolare, grazie alla combustione di combustibili fossili [6]. Il mondo in via di sviluppo continuerà a concentrarsi sulla crescita e sul miglioramento delle condizioni di vita, e ciò semplicemente non può essere realizzato solo con l'energia eolica e solare: la maggior parte dell'elettricità mondiale continuerà a provenire dalla combustione di carbone o gas naturale per decenni [6]. La giustizia climatica deve richiedere che i poveri del mondo (non solo l'élite nei paesi occidentali) abbiano il diritto a un tenore di vita più alto. Ciò richiede la disponibilità di energia accessibile, compresa quella proveniente dai combustibili fossili, fino a quando alternative proposte, come eolico e solare, ed eventuali tecnologie ancora non scoperte, diventino affidabili ed economicamente sostenibili.

Tuttavia, affinché ciò accada, sarà necessario superare significativi ostacoli, tra cui lo sviluppo dei mezzi per immagazzinare l'energia per l'uso quando in assenza di sole o vento. Infatti, lo sviluppo di batterie in grado di immagazzinare sufficiente energia per soddisfare le svariate esigenze è ancora un collo di bottiglia, che è stato persino segnalato da Thomas Edison a Henry Ford nella loro competizione per il controllo dei motori nel settore dei trasporti oltre 100 anni fa [6].

4. Motore a combustione interna ed elettrificazione

È probabile che la mobilità futura sarà caratterizzata da una combinazione di soluzioni, coinvolgendo veicoli elettrici a batteria e ibridi (BEV e HEV), veicoli elettrici a celle a combustibile e veicoli convenzionali, a seconda dell'accettazione del consumatore (ad esempio, il costo), del paese considerato e dell'applicazione specifica (città, paese, personale, merci, ecc.). Pertanto, il motore a combustione svolgerà ancora un ruolo centrale, sia che venga utilizzato per la generazione di energia o per alimentare il veicolo stesso, sia che venga adoperato nelle configurazioni di propulsione fortemente elettrificate. Per questo motivo, c'è un grande interesse nel migliorare l'efficienza termica dei motori a combustione interna senza aumenti significativi nei costi di acquisto e di

esercizio nel breve-medio termine. Questi obiettivi possono essere raggiunti attraverso miglioramenti nella combustione, nei sistemi di post-trattamento e controllo, e attraverso l'elettrificazione parziale sotto forma di ibridazione, insieme alla riduzione del peso del veicolo e a sistemi ausiliari più efficienti.

Nonostante ci sia attualmente un grande interesse nell'elettrificazione del trasporto, solo i BEV eliminano la necessità di un motore a combustione interna. Tuttavia, le analisi del ciclo di vita e dell'impatto dei gas serra dei BEV che considerano l'energia utilizzata nella generazione di elettricità e nella produzione delle batterie mostrano che il loro vero beneficio è significativamente inferiore a quanto appare a prima vista [6]. Molte analisi ignorano l'anidride carbonica a monte nell'estrazione, raffinazione e trasporto dei componenti chiave del sistema propulsivo BEV, così come nella produzione e distribuzione di elettricità. Grandi quantità di energia sono necessarie per estrarre le materie prime critiche fondamentali per batterie e motori elettrici (cobalto, litio, terre rare, ecc.), insieme a enormi quantità di acqua. Lo smaltimento a fine vita, in particolare la tossicità, deve anch'esso essere considerato nelle analisi del ciclo di vita. (Molte di queste considerazioni si applicano anche agli impianti per la generazione di energia eolica e fotovoltaica solare).

Inoltre, la costruzione di una nuova infrastruttura elettrica, in grado di ricaricare milioni di BEV, richiederà ulteriori materie prime e consumo di energia (con conseguenti emissioni di CO₂), e potrebbe essere limitata dalla disponibilità di materiali critici. L'alto costo dei BEV, rispetto ai veicoli a motore a combustione interna (convenzionali o ibridi), sta anche guidando lo sviluppo di metodi efficaci, ma precedentemente considerati non economici, per aumentare l'efficienza del motore a combustione interna con modalità di combustione avanzate e per ridurre ulteriormente le emissioni inquinanti. In questo senso, la competizione tra motori elettrici e motori a combustione interna sta stimolando un'evoluzione benefica del motore termico stesso.

5. Zero Emissioni

Si stima che il consumo di carburante nei veicoli ad accensione comandata potrebbe essere ridotto fino al 50% negli Stati Uniti rispetto alla media attuale, e le emissioni di CO₂ dal tubo di scarico potrebbero essere ridotte di conseguenza. Con catalizzatori e sistemi di controllo esistenti (che continuano a migliorare), il particolato, gli NO_x, gli idrocarburi incombusti e il CO potrebbero essere ridotti a livelli trascurabili sia

nei motori SI che nei motori Diesel.

Spesso, le emissioni di inquinanti e le emissioni di CO₂ dalla combustione vengono presentate come equivalenti, in modo che anche i motori con emissioni estremamente basse di inquinanti critici (NO_x, CO, idrocarburi incombusti e particolato) siano considerati inquinanti. Tecnicamente e praticamente, c'è una distinzione importante. Le emissioni di CO₂ accompagnano necessariamente qualsiasi processo di combustione degli idrocarburi o ossidazione chimica, compresa la vita umana e animale. L'anidride carbonica emessa da un motore è direttamente proporzionale al combustibile ad idrocarburi consumato, che viene costantemente ridotto grazie a miglioramenti tecnologici.

Per quanto riguarda gli inquinanti critici, l'obiettivo di raggiungere veicoli con "emissioni a impatto zero" è molto vicino, grazie a modalità di combustione avanzate e sistemi di post-trattamento innovativi, compreso l'ampio utilizzo di catalizzatori e filtri per particolato Diesel e benzina ad alta efficienza di filtrazione nel sistema di post-trattamento, mentre l'uso di iniezioni di urea e la riduzione catalitica selettiva portano a emissioni di NO_x estremamente basse (ad esempio, 15-20 mg/km). Ci sono persino esempi di veicoli con emissioni di idrocarburi incombusti dal tubo di scarico inferiori a quelle nell'aria ambiente all'aspirazione del motore, i cosiddetti veicoli con emissioni negative! Le emissioni di inquinanti scaricate dal tubo di scarico saranno così basse da essere difficilmente misurabili, e il loro impatto pratico sulla qualità dell'aria sarà trascurabile [6].

Per quanto riguarda le emissioni di particolato, l'impatto dell'usura di pneumatici e freni è già molto più elevato rispetto a quello dovuto al motore a combustione interna (l'usura degli pneumatici produce circa 50 mg/km di particolato), raggiungendo valori circa 10 volte superiori alle emissioni del motore (5 mg/km). Questo implica che l'attuale auto alimentata da un motore a combustione interna è equivalente alle auto completamente elettriche e ibride per quanto riguarda le emissioni di particolato, quando si tiene conto dei contributi di pneumatici, freni e di altre fonti (ad esempio, polvere stradale).

Esistono *trend* tecnologici per una riduzione a breve termine delle emissioni di CO₂ che sembrano essere più fattibili e più rapidi. In primo luogo, il passaggio da benzina a motore a combustione interna a Diesel riduce le emissioni di CO₂ del 11% dal tubo di scappamento, e un ibrido leggero Diesel fornisce una riduzione ulteriore del 6%. Il passaggio finale a un ibrido completo fornisce un'altra riduzione del 16%. Tuttavia, è opportuno notare che sussiste ancora una concezione errata molto popolare, basata su

tecnologie obsolete e aggravata dai recenti scandali sulle emissioni, secondo la quale il motore Diesel sia un sistema di propulsione ad alto inquinamento. Ciò ignora i significativi progressi compiuti negli ultimi decenni sui motori Diesel e nel post-trattamento delle emissioni.

Miglioramenti consistenti sui motori a benzina sono anche disponibili con l'elettrificazione dei veicoli. Un passaggio diretto da benzina a benzina ibrida leggera può fornire un 11%, e un ulteriore 23% passando a un ibrido completo. Come indicano questi numeri, ci sono opzioni a breve termine per un miglioramento significativo dell'efficienza del carburante e, quindi, una riduzione delle emissioni di CO₂ dell'ordine del 30% o più, sia per l'alimentazione a benzina che a Diesel.

Sembra, inoltre, chiaro che i veicoli elettrici a "zero emissioni" difficilmente potranno sostituire in modo significativo i motori a combustione interna nel trasporto commerciale a causa del peso, delle dimensioni e dei costi delle batterie. A meno di una radicale innovazione nelle tecnologie delle batterie, nel futuro prevedibile i motori a combustione interna alimentati con carburanti liquidi a base di petrolio continueranno in gran parte a garantire il trasporto di merci nel mondo.

Una transizione dal motore a combustione interna a benzina o Diesel a un ibrido completo benzina/Diesel può ridurre significativamente le emissioni. Tuttavia, a causa del lungo periodo di rotazione e sostituzione dei veicoli, molto tempo (decenni) sarà necessario affinché gli ibridi completi, anche se diventassero molto più comuni ed economici rispetto alla situazione odierna, possano rappresentare un'aliquota significativa della popolazione mondiale di veicoli.

D'altra parte, la sostenibilità del trasporto in termini di gas serra e di altri impatti ambientali, la convenienza e la sicurezza energetica possono con ogni probabilità essere soddisfatte migliorando anche dai motori a combustione interna di ultima generazione purché si confermi un rinnovato impegno nella ricerca e nello sviluppo dei motori.

6. Combustibili

A medio-lungo termine, sussiste un ampio margine per migliorare ulteriormente i motori attraverso la progettazione congiunta di sistemi carburante/motore per prestazioni ottimali. Le tecnologie a singolo e doppio combustibile, come l'accensione a compressione con carica omogenea, l'accensione a compressione controllata con miscela premiscelata e l'accensione a compressione controllata con reattività, risultano mol-

to promettenti per migliorare l'efficienza e ridurre le indesiderate emissioni allo scarico.

Queste modalità avanzate di combustione possono trarre beneficio sia dai carburanti disponibili sia da quelli la cui composizione è ottimizzata per ciascuna applicazione. Per ridurre anche la dipendenza dai combustibili fossili e per una transizione verso la decarbonizzazione, si stanno compiendo progressi nell'introduzione di biocarburanti e carburanti sintetici neutri per quanto riguarda l'emissione di CO₂.

Spesso, le critiche al motore a combustione interna non riguardano il motore stesso, ma la fonte del carburante, e l'uso di biocarburanti o carburanti sintetici può mitigare le emissioni totali di carbonio. In effetti, alcuni bio-diesel commercializzati sono oggi più del 70% neutri per il carbonio netto. Alcuni paesi e stati hanno addirittura implementato uno standard di carburante a basso tenore di carbonio e forniscono incentivi monetari per stimolare il mercato dei biocarburanti.

L'olio vegetale idro-trattato è un promettente carburante rinnovabile per motori Diesel con un impatto di CO₂ molto basso. Un'altra tecnologia emergente produce carburanti liquidi per il trasporto da biomasse ligneo-cellulosiche solide, non alimentari, attraverso la pirolisi veloce, un processo di decomposizione termica che scompone i materiali per mezzo del calore in assenza di ossigeno, producendo *syngas*, bio-olio e bio-char. Il bio-olio può essere potenziato cataliticamente per ottenere carburanti liquidi. Di conseguenza, la pirolisi veloce di biomasse di scarto può produrre biocarburanti e potrebbe consentire un'economia a basso tenore di carbonio.

È stato anche proposto l'uso di carburanti sintetici alternativi derivati da biomasse di scarto ed energia elettrica rinnovabile per produrre un e-carburante con emissioni nette di CO₂ zero (cioè, neutro dal punto di vista del carbonio). Questo approccio è attualmente oggetto di studio come un modo intelligente per immagazzinare l'energia elettrica rinnovabile quando si verifica un picco di produzione, grazie a un processo chimico per generare idrocarburi da H₂ (prodotto dall'elettrolisi dell'acqua) e CO₂ catturato direttamente dall'atmosfera o da altre fonti industriali o biologiche. A lungo termine, le tecnologie di cattura del carbonio hanno dimostrato di poter raccogliere e poi smaltire o sequestrare l'anidride carbonica dai tubi di scarico dei veicoli e si prevede che siano economicamente convenienti.

7. Sorgenti di Energia del Futuro

Per l'elettrificazione, l'elettricità deve essere pro-

dotta, o dal motore a combustione interna (nel caso di un veicolo ibrido), o da una centrale elettrica e dalla rete elettrica.

Nel caso di quest'ultima, essa è attualmente prodotta da fonti di energia non rinnovabile (con circa il 40%-50% di perdite, anche se queste possono essere notevolmente più elevate per le vecchie centrali elettriche a carbone ancora presenti in gran parte del mondo). Inoltre, il trasporto dell'elettricità all'utente finale, insieme alle corrispondenti perdite di carica/scarica della batteria e il ruolo di temperature di esercizio estreme nella riduzione delle prestazioni della batteria, comportano un'altra perdita del 5%-20%, risultando in un'efficienza complessiva che è effettivamente comparabile a quella dei veicoli ibridi alimentati con motori a combustione interna e combustibili fossili. Forse c'è un vantaggio politico nel prelevare energia dalla rete, dato che le emissioni indesiderate non sono "nel mio cortile". Il problema viene spostato in aree meno visibili, ma con una riduzione sostanzialmente inferiore, e a volte nulla, dell'impronta di carbonio globale. Infatti, un veicolo elettrico a batteria (BEV) alimentato da elettricità prodotta da centrali a carbone può facilmente avere un impatto ambientale maggiore rispetto a un veicolo a motore a combustione interna non ibrido di dimensioni comparabili.

Le fonti rinnovabili (incluse l'idroelettrico) costituiscono attualmente circa il 10% del mix energetico globale. La revisione dell'energia mondiale prevede che la frazione di produzione totale di energia da fonti rinnovabili raggiungerà solo circa il 14% entro il 2040, e in molte regioni i combustibili fossili, inclusi il carbone, rimarranno la principale fonte di energia.

È quindi chiaro che, nel medio termine, l'alternativa dei trasporti BEV potrebbe ridurre modestamente, ma in nessun caso eliminare, le emissioni globali di CO₂. Naturalmente, con una riduzione dell'elettricità prodotta da centrali a carbone e l'adozione di tecnologie neutre per la CO₂, questa situazione potrebbe cambiare.

Inoltre, sarà necessaria una ricarica molto più rapida per ottenere una vasta accettazione di veicoli *plug-in* e BEV; si noti che essenzialmente tutti gli scenari attuali coinvolgono consistenti sovvenzioni da parte del contribuente o del consumatore per tali stazioni di ricarica. Inoltre, l'elettrificazione su larga scala richiederà modifiche drastiche all'intero sistema di distribuzione elettrica, dalla centrale elettrica al punto di ricarica.

Considerando questi problemi, anche le previsioni di mercato *mainstream* più aggressive mostrano che i motori a combustione interna saranno ancora presenti nella maggior parte delle auto nel 2040 e rappresenteranno una parte ancora più consistente del mercato del trasporto merci.

La sostituzione dei motori a combustione interna nei trasporti pesanti incontra ancor maggiori difficoltà in questo senso. Ad esempio, un camion pesante di Classe 8 negli Stati Uniti con autonomia di 500 miglia, funzionando come veicolo elettrico, richiede una batteria con un'energia di circa 1000 kWh. Presumendo un'efficienza batteria-motore del 95%, la batteria appropriata pesa almeno 5,5 tonnellate metriche (rispetto a circa 1,3 tonnellate metriche per un motore Diesel) e consuma una parte significativa del carico utile consentito. Con il Supercharger Tesla da 120 kW, la batteria richiede circa 12 ore per ricaricarsi.

Inoltre, la sostituzione dei motori di treni e navi sembra quasi fuori discussione, testimonianza dei requisiti estremamente elevati di potenza e dei tempi di ricarica inaccettabilmente lunghi necessari per tali applicazioni.

Un futuro della mobilità sostenibile richiederà un portafoglio diversificato per garantire le tecnologie giuste per le applicazioni giuste e comprenderà motori a combustione interna, celle a combustibile, veicoli elettrici puri e sistemi di propulsione ibrida.

Le comparazioni equivalenti sono cruciali per valutazioni accurate delle tecnologie in termini di impatti sociali, economici ed ambientali. Più specificamente, le tecnologie di successo devono essere competitive sul mercato in termini di costo, requisiti degli utenti, emissioni ed efficienza durante il ciclo di vita; devono garantire la sicurezza energetica nazionale; e devono considerare gli impatti sociali legati alla produzione e all'acquisizione e riciclo di materiali critici.

A tal fine, il motore a combustione interna e l'infrastruttura di supporto sono ben consolidati, e le innovazioni legate allo sviluppo tecnologico continuano a migliorare l'efficienza complessiva e la riduzione delle emissioni delle tecnologie basate sulla combustione.

8. L'allarme climatico

La risposta popolare e governativa agli effetti previsti del riscaldamento globale antropogenico varia dallo scetticismo all'allarme, con l'allarme che domina la percezione pubblica recente, i contenuti mediatici e le politiche nazionali e regionali annunciate. La necessità e/o il ruolo della ricerca e sviluppo sulla combustione del motore nel percorso verso un mondo privo di emissioni di CO₂ sono oggetto di dibattito, ma molti analisti ritengono che il motore a combustione interna continuerà a svolgere un ruolo importante, per il motivo che una transizione energetica richiederebbe senza dubbio un tempo significativo [4]. Tuttavia, c'è ancora notevole controversia sul ruolo preciso dei gas serra antropogenici e della CO₂, nonché sul principale

gas serra, l'acqua, nel cambiamento climatico globale [7]. Una considerazione spesso trascurata riguarda i carburanti idrocarburici, infatti ogni molecola di CO₂ che esce dal tubo di scarico del veicolo è accompagnata da almeno una molecola di H₂O. Il bilancio effettivo tra il vapore acqueo (come gas serra) e le nuvole nell'atmosfera, che riflettono i raggi solari nello spazio e, quindi, causano il raffreddamento della Terra, è ancora un'area attiva di ricerca climatica [8].

Per quanto riguarda le emissioni di gas serra, il contributo dei trasporti alle emissioni del Potenziale di Riscaldamento Globale è storicamente rimasto al 10%, come si può vedere nella Figura 2. Quindi, un massiccio passaggio globale ai veicoli elettrici potrebbe portare solo a una riduzione globale (potenziale) di circa il 10% delle tonnellate equivalenti di CO₂. (Ciò presuppone anche che tutti i veicoli elettrici caricano le loro batterie da fonti di energia senza emissioni di CO₂, cioè rinnovabili/nucleari.) Anche per i veicoli leggeri, come descritto in questa nota, un futuro completamente elettrico non arriverà facilmente, rapidamente o a buon mercato, e il trasporto guidato da motori a combustione interna avrà comunque un ruolo importante per almeno i prossimi tre decenni [9].

Potrebbe essere un tragico errore se l'industria e i governi abbandonassero le riduzioni più realistiche a breve e medio termine delle emissioni di CO₂ e degli inquinanti atmosferici ottenibili con la propulsione basata su motori a combustione interna, a causa di un eccessivo ottimismo sulla velocità con cui le fonti di energia rinnovabile o decarbonizzate possano sostituire l'energia da combustibili fossili per i trasporti.

D'altra parte, l'universo in rapida espansione degli apparecchi elettronici per i consumatori è pronto a superare i trasporti come fonte di consumo globale di energia. Nel 2015, dispositivi connessi a Internet, *streaming video* ad alta risoluzione, *e-mail*, telecamere di sorveglianza e *smart TV* hanno consumato dal 3% al 5% dell'elettricità mondiale. La crescita dell'Internet delle cose, veicoli senza conducente, robot e intelligenza artificiale (AI) sta contribuendo significativamente a questa domanda di energia. Si stima che computer e comunicazioni potrebbero utilizzare fino al 20% dell'elettricità mondiale entro il 2025 [4].

Un aumento dell'efficienza dei motori a combustione interna e di altri sistemi di consumo dell'energia potrà in futuro rappresentare una strategia efficace per la mitigazione sistematica degli effetti potenziali del riscaldamento globale.

9. Direzioni future della ricerca

Nella sezione finale di questo articolo si fornisce un elenco (certamente non esaustivo) di argomenti di ricerca potenzialmente fruttuosi che sarebbero utili per il campo dei motori ICE. Gli avanzamenti in queste aree potrebbero sicuramente beneficiare di collaborazioni globali tra ricercatori delle industrie, laboratori governativi e accademie.

10. Efficienza del motore

Lo sviluppo di nuovi sistemi di combustione, compreso l'utilizzo di pressioni di iniezione del carburante ultra-alte e nuove configurazioni meccaniche, possibilmente oltre il meccanismo a manovella scorrevole, dovrebbe essere incoraggiato. Questo potrebbe essere abbinato a tecnologie di combustione altamente diluita (stechiometrica con ricircolo dei gas di scarico così come combustione magra con rapporti aria/combustibile superiori a 2). Per questo miglioramento della combustione, è necessario investigare sulla formazione della miscela e sul movimento della carica, e sulle tecnologie di accensione, compresa l'installazione di pre-camere.

11. Scambio di gas

Miglioramenti nella respirazione del motore sono di interesse, potenzialmente attraverso turbocompressori di gas di scarico per realizzare una risposta rapida e una combustione a bassa temperatura con sovralimentazione ad ultra-alta pressione, grandi quantità di ricircolo di gas di scarico e ulteriori miglioramenti nel ciclo termodinamico con sistemi di valvole variabili, mantenendo comunque i livelli di ossigeno richiesti. Dovrebbe essere incoraggiato ulteriormente lo sviluppo dei sistemi di recupero dell'energia dei gas di scarico con *turbocompound* e possibilmente il *reforming* chimico.

12. Elettrificazione

L'elettrificazione offre miglioramenti significativi nell'efficienza dei sistemi, così come il controllo delle emissioni di gas serra, potenzialmente portando a efficienze termiche oltre il 50%. Lo sviluppo di motori più efficienti specificamente per sistemi ibridi e *range extender* (che consentono al motore di funzionare su un intervallo limitato di velocità e carico) sarebbe anche utile.

13. Lubrificazione del motore

La riduzione delle perdite meccaniche dovrebbe essere ottenuta migliorando i sistemi di lubrificazione con un minore consumo di olio, specialmente per i nuovi motori con aree operative limitate in termini di carichi o velocità.

14. Gestione termica ed energetica del motore

La gestione termica ed energetica del motore è necessaria per rispettare le emissioni reali durante la guida e migliorare l'economia del carburante. Non solo la riduzione delle perdite di calore del motore a combustione interna, ma anche migliorati sistemi termici che includano dispositivi di recupero del calore dei gas di scarico, sistemi di post-trattamento e il loro controllo ottimale saranno tecnologie chiave per il futuro.

15. Post-trattamento del motore

Tecnologie di riduzione delle emissioni che puntano a emissioni prossime allo zero sono richieste anche dalle normative nazionali ed europee. È sempre più necessaria la progettazione ed installazione di sistemi di post-trattamento migliorati e a basso costo per rimuovere emissioni di idrocarburi incombusti, particolato e NO_x in condizioni di gas di scarico a bassa temperatura e con eccesso di ossigeno senza sacrificare l'efficienza termica è necessaria. Dovrebbero essere esplorate metodologie per ridurre le emissioni dai veicoli a motore a benzina a pieno carico in combustione arricchita o avviamento a freddo (che generano molto particolato) con dispositivi di post-trattamento meno costosi.

16. Carburanti

L'uso efficiente della combustione bifuel e della combustione di Diesel/gas naturale dovrebbero essere oggetto di più approfondite ricerche. Oltre alla combustione estremamente diluita e allo sviluppo di sistemi di iniezione diretta di gas, è necessario investire in ricerche per ridurre lo scivolamento del metano e migliorare l'efficienza termica e le emissioni di gas di scarico sui motori a gas naturale, specialmente per navi e sistemi in cogenerazione. L'analisi dell'uso globale dei carburanti suggerisce che l'uso di combustibili con un basso numero di ottano diventerà un argomento importante nel prossimo futuro [10].

Inoltre, ricerche più intense su biocarburanti ed e-carburanti per la mitigazione dei gas serra sarebbe utile. I “carburanti progettati” offrono il potenziale per miglioramenti dell’efficienza e per emissioni inquinanti prossime allo zero [11]. Questi potrebbero includere miscele di quantità variabili di H_2 con idrocarburi, componenti ossigenati e persino nuovi componenti chimici (ad esempio NH_3).

17. Simulazioni del motore

Supportate da esperimenti dettagliati, ci sono stati grandi progressi nella fluidodinamica numerica dei processi di combustione. Gli strumenti di simulazione sono ora ampiamente utilizzati dalla maggior parte dei produttori di motori per aiutare a progettare e ottimizzare i motori, beneficiando della vasta potenza computazionale disponibile sia per l’industria che per l’accademia (ad esempio [12]). Grazie al rapido sviluppo dell’intelligenza artificiale, varie previsioni e ottimizzazioni automatiche stanno diventando di uso pratico. Tuttavia, l’ottimizzazione della combustione del motore si basa su sotto-modelli accurati, molti dei quali necessitano di ulteriore sviluppo per aumentare la loro capacità predittiva, nonché per ridurre la necessità di calibrazioni empiriche.

Questa è un’area attiva di ricerca che utilizza simulazioni numeriche molto sofisticate con una prosima introduzione di tecnologie di apprendimento automatico e *data science*. Inoltre, la combustione del motore include fenomeni transitori come le variazioni ciclo per ciclo che non sono ben compresi né analizzati. È necessario lo sviluppo di modelli di simulazione del veicolo che includano la fonte di alimentazione insieme ai suoi componenti di sistema, trasmissione, dispositivi periferici, batteria, motore, inverter e resistenza alla guida.

18. Controllo del motore e del veicolo

Il controllo della combustione in tempo reale per ridurre i margini di controllo e le variazioni ciclo per ciclo richiede innovazioni nella calibrazione del software di controllo, possibilmente con il controllo basato su modelli fisici/statistici utilizzando l’intelligenza artificiale. È necessaria l’ottimizzazione a bordo dei sistemi multi-input/multi-output con il controllo predittivo basato su modelli. Il controllo dei sistemi di iniezione efficiente del carburante per ottimizzare la formazione spaziale e temporale della miscela nella camera di combustione e i metodi per garantire l’accensione stabile in miscele molto magre o dilui-

te nei motori a iniezione di benzina, eventualmente utilizzando pre-camere e plasmi a bassa temperatura, sarebbe di grande interesse.

19. Conclusioni

In sintesi, il motore a combustione interna (ICE) e la ricerca sui motori a combustione interna sembrano disporre ancora di un futuro promettente, a differenza di alcune relazioni mediatiche ampiamente diffuse (ad esempio [13]). L’industria della generazione di energia, quella dei veicoli e dei carburanti sono enormi, rappresentando trilioni di dollari statunitensi di fatturato annuo, con un’infrastruttura massiccia.

Siamo certamente in tempi rivoluzionari, ma è evidente che le fonti di generazione di energia non diventeranno completamente rinnovabili e il trasporto non diventerà completamente elettrico per diversi decenni [6]. Tuttavia, la ricerca per migliorare l’efficienza e i metodi per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili sono direzioni promettenti anche per la futura ricerca sui motori a combustione interna. È molto probabile che motori altamente efficienti e completamente flessibili con soluzioni ibride saranno una parte significativa degli ambiti del tanto atteso miglioramento dell’efficienza, così come delle riduzioni delle emissioni e dei gas serra [14].

Infine, è necessario riconoscere che, nella pratica, le persone scelgono la loro preferenza di propulsore basandosi su numerosi fattori, tra cui il costo. La predilezione dei consumatori non è decisa dai politici, né dai costruttori di auto, né dall’accademia.

Una politica che favorisca unilateralmente una soluzione tecnologica potrebbe essere profondamente inefficace e forse persino rappresentare la soluzione sbagliata nel lungo termine. Invece, un approccio probabilmente migliore è quello di consentire anche alle tecnologie concorrenti di sopravvivere e di prosperare qualora dimostrino indubbiamente significativi miglioramenti di efficienza e di riduzione delle emissioni.

La conclusione spontanea che emerge da questa nota è che, per il futuro prevedibile, il trasporto su strada e fuoristrada sarà caratterizzato da una combinazione di soluzioni che includono motori a combustione interna (ICE) e powertrain ibridi e a batteria.

Bibliografia

- [1] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W., *Combustion Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, Springer 4th Edition, 2006.
- [2] Graves, R., *I Miti Greci*, Longanesi, 1992.
- [3] BP. *Statistical review of world energy*. BP Magazine, June

- 2018, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [4] Ritchie H and Roser M. CO₂ and other greenhouse gas emissions. Our World in Data, May 2017, <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- [5] SAGE. International Journal of Engine Research, <https://us.sagepub.com/en-us/nam/journal/internationaljournal-engine-research> (accessed 7/2019).
- [6] Reitz, R.D., et al., IJER editorial: The future of the internal combustion engine International J of Engine Research 2020, Vol. 21(1) 3-10.
- [7] Yin, J. and Porporato, A. Diurnal cloud cycle biases in climate models. Nat Commun 2017; 8: 2269.
- [8] ACS. It's water vapor, not the CO₂, <https://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/climatesciencenarratives/its-water-vapor-not-the-co2.html> (accessed 7/2019).
- [9] Kalghatgi G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? Appl Energ 2018; 225: 965-974.
- [10] Kalghatgi GT. The outlook for fuels for internal combustion engines. Int J Engine Res 2014; 15: 383-198.
- [11] European Academies Science Advisory Council (EAS AC). Decarbonisation of transport: options and challenges, https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Decarbonisation_of_Transport/EASAC_Decarbonisation_of_Transport_FINAL_March_2019.pdf (accessed 7/2019).
- [12] Hasse C. Scale-resolving simulations in engine combustion process design based on a systematic approach for model development. Int J Engine Res 2016; 17: 44-62.
- [13] Berkeley J. The death of the internal combustion engine, The Economist, 12 August 2017, <https://www.economist.com/leaders/2017/08/12/the-death-of-the-internal-combustion-engine>.
- [14] Auto Tech Review. Internal combustion engine 4.0, <https://autotechreview.com/technology/internal-combustion-engine-4-0> (accessed 8/2019).

“L'articolo esprime esclusivamente le opinioni personali dell'autore e non la posizione ufficiale di qualsiasi ente ad egli riconducibile”.

GUIDO SACCONE

Nato a Napoli il 15 novembre 1977, laureato in ingegneria chimica nel 2004 presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, ha conseguito un master in comunicazione e divulgazione scientifica nel 2006 e un dottorato di ricerca in ingegneria dei materiali e delle strutture nel 2008 presso la medesima istituzione accademica. Nel 2012 è stato assunto presso l'Unità di Propulsione del Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA) dove attualmente lavora nel laboratorio di Tecnologie per l'Esplorazione dello Spazio. Per quanto attiene all'attività di ricerca, si occupa di numerosi progetti di rilevanza nazionale e internazionale, specialmente sul tema della combustione e sui materiali innovativi per missioni di esplorazione e colonizzazione lunare e marziana. Per quanto riguarda l'attività di divulgazione scientifica, ha partecipato nel 2007-2008 al comitato di redazione della rivista Trasferimento Tecnologico ed è attualmente Segretario/Tesoriere dell'associazione Amici di Città della Scienza, in collaborazione con la quale organizza non di rado seminari culturali su temi inerenti specialmente alla chimica e ai materiali. È inoltre, membro del Comitato di Redazione della rivista quadrimestrale Analysis di proprietà dell'Associazione Nazionale Professionale per la Ricerca - ANPRI. Infine, è autore di numerose pubblicazioni su riviste scientifiche di settore e ha partecipato a svariati congressi internazionali.

Graduated in chemical engineering in 2004 from the University of Naples Federico II, he also received a master's degree in science communication and popularization in 2006 and a PhD in materials and structures engineering in 2008. In 2012, he was employed at the Propulsion Unit of the Italian Aerospace Research Center (CIRA) where he currently works in the Space Exploration Technologies laboratory. He has been involved in numerous projects of national and international relevance, especially on the topic of combustion and innovative materials for lunar and Martian exploration and colonization missions. He is a member of the Editorial Board of the journal Analysis of the National Professional Association for Research - ANPRI. Finally, he is the author of numerous publications in relevant scientific journals and has participated in numerous international conferences.

Contatti

guidosaccone77@gmail.com