



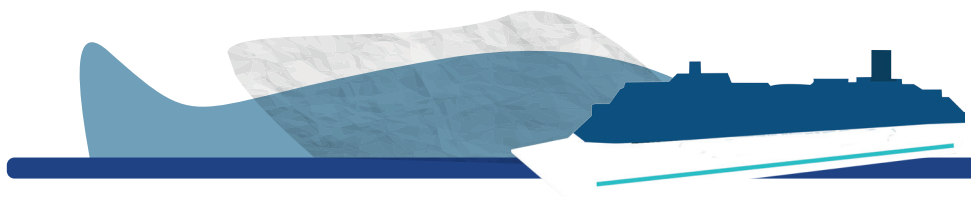
OPZIONI E PROSPETTIVE PER IL TRASPORTO MARITTIMO, AEREO E STRADALE AL 2030 E AL 2050

APPENDICE TECNICA SU ALIMENTAZIONI E POWERTRAIN

RAPPORTO RIE PER UNEM



Trasporto marittimo



Le opzioni

1. **Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$** - Motori a combustione interna (MCI) tradizionali;
2. **Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% e *scrubber*** – MCI tradizionali;
3. **GNL** – MCI con alimentazione per GNL;
4. **Powertrain ibridi - Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$** con motore elettrico e batteria accoppiati ad un MCI (ambiti specifici);
5. **Metanolo** – MCI con alimentazione per metanolo;
6. **Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniacale, tradizionale e e-ammoniacale)** – MCI o *fuel cell* con ibridizzazione elettrica dove utile.

1. Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$

Il bunker marino tradizionale (HFO, con tenore di zolfo al 3,5%) è uno dei prodotti derivanti dalla raffinazione del greggio; ha una formulazione simile a quella degli oli combustibili, ponendo particolare attenzione solo ad alcune caratteristiche sensibili per il corretto funzionamento dei motori navali. Con la nuova regolamentazione IMO, il riferimento è ora rappresentato dai combustibili a basso tenore di zolfo ($\leq 0,5\%$); l'origine del prodotto rimane la stessa ma potrebbe rendersi necessaria una modifica della *crude slate*, più orientata a greggi *sweet* anziché *sour*.

La soluzione più immediata è il **gasolio marino** (*marine gasoil*), un distillato a bassissimo contenuto di zolfo, inferiore allo 0,1%, e attualmente impiegato solo negli stazionamenti in porto e nelle cosiddette aree ECA. Una seconda alternativa può essere quella di impiegare **distillati pesanti** più difficilmente destinabili alla produzione di gasolio. Si tratta di componenti per *blend* alternativi (ad esempio il *Vacuum Gas Oil* -VGO), che presentano contenuti di zolfo compresi nel *range* 0,15%-0,40% e quindi in linea con il *cap* in vigore da gennaio 2020. È una scelta che presenta diversi vantaggi - tra i quali un costo inferiore rispetto al gasolio marino - ma è difficilmente percorribile in tutte le raffinerie, in quanto solo quelle caratterizzate da un assetto impiantistico con un grado di conversione medio-alto possono disporre di tali componenti.

Esiste poi la possibilità di formulare un **Ultra Low Sulphur Fuel Oil** (ULSFO) che, benché formulato come un normale olio combustibile, presenta un contenuto di zolfo a specifica IMO. Potrebbe affermarsi come l'opzione meno onerosa per la *compliance* alle nuove regole ma è difficilmente disponibile in volumi sufficienti per soddisfare la domanda mondiale.

Nei diversi porti, la differente composizione delle tipologie di prodotti indicate (i *fuel oil* sono tipicamente aromatici mentre i distillati sono maggiormente paraffinici) può dar luogo a

fenomeni di incompatibilità, con potenziali problematiche anche meccaniche sui motori delle navi. Deve essere quindi assicurato che in qualunque posto del mondo si faccia rifornimento, il nuovo prodotto acquistato, una volta miscelato con quello ancora presente nei serbatoi della nave, non comporti modifiche sostanziali alle proprietà fisiche dei bunker.

Per gestire al meglio questo ventaglio di problematiche, l'industria nel suo complesso (armatori, produttori di combustibili, costruttori di motori, ecc.) sta predisponendo apposite linee-guida sui potenziali rischi operativi e di sicurezza legati alla fornitura e all'uso del nuovo bunker a basso tenore di zolfo.

La norma tecnica che fissa le caratteristiche ambientali e prestazionali del bunker a livello mondiale, la ISO 8217, è attualmente in fase di revisione (attesa per il 2022) e nel frattempo è disponibile una specifica di rango inferiore (*Publicly Available Specification* - PAS23263), destinata a governare soprattutto i problemi di stabilità e compatibilità.

2. Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo al 3,5% con scrubber

Il bunker marino tradizionale deriva dalla distillazione e raffinazione del greggio ed è stato sempre formulato alla stregua degli oli combustibili. La sua denominazione tipica è infatti olio combustibile pesante (*heavy fuel oil* -HFO), con contenuto di zolfo al 3,5%. Stante la nuova regolamentazione IMO, il suo impiego è consentito solo se abbinato all'installazione di *scrubber* a bordo, ovvero impianti di pulizia dei gas di scarico che rendono il livello delle emissioni di zolfo della nave compatibile con il *cap* dello 0,5%.

La scelta dell'armatore di optare per l'installazione di uno *scrubber* a bordo nave potrebbe scontrarsi con restrizioni ambientali tali da rendere questo approccio non sostenibile. Ad esempio, in alcune zone come Cina, Singapore, Belgio e Fujairah è già vietato il ricorso a *scrub-*

ber a ciclo aperto (*open loop*)¹ che, coprendo oltre l'80% delle installazioni, rappresenta la tipologia ad oggi più utilizzata. A tendere, occorre anche considerare le difficoltà dell'offerta di soddisfare una domanda di *scrubber* stimata in crescita.

3. Gas Naturale Liquefatto – GNL

Si ottiene sottoponendo il gas naturale, dopo opportuni trattamenti di depurazione e disidratazione, a successive fasi di raffreddamento e condensazione. Il prodotto che ne deriva si presenta come un liquido inodore e trasparente costituito da una miscela composta prevalentemente da metano (e da quantità nettamente minori di etano, propano, butano e azoto) ed avente una temperatura di ebollizione di circa -160 °C a pressione atmosferica.

Questa condizione fa sì che la sua conservazione debba avvenire in appositi tank isolati, per lo più di grandi dimensioni: il GNL, infatti, nonostante presenti una densità energetica superiore a quella dei bunker petroliferi, risulta caratterizzato da una densità volumetrica di gran lunga inferiore. Le cisterne cilindriche che lo contengono occupano in media uno spazio 3-4 volte superiore a quello richiesto da un ammontare equivalente di energia stoccata sotto forma di bunker *oil-based*.

4. Metanolo

Tra tutti i combustibili liquidi, il metanolo (CH₃OH) è quello che presenta il più basso contenuto di carbonio (un atomo) e il più alto contenuto di idrogeno. È il più semplice degli alcoli, è liquido a temperatura e pressioni normali, ed è quindi facile da stoccare e da trasportare, ma è tossico. Il metanolo può essere prodotto a partire da differenti *feedstock*, principalmente gas naturale e carbone, ma anche

¹ Negli impianti di desolfurazione dei fumi con sistema a circuito aperto (*open loop*) l'acqua di mare, con la sua naturale alcalinità, viene utilizzata per il lavaggio dei fumi di scarico: l'ossido di zolfo dei gas di scarico reagisce con l'acqua e crea gli acidi solforici. In questo processo non si utilizza la soda caustica o altri composti chimici. Successivamente l'acqua per il lavaggio viene pompata attraverso il sistema di filtraggio, prima di uscire dal sistema ed essere reimpressa in mare.

da fonti rinnovabili o direttamente dalla CO₂ catturata dalle centrali elettriche (idrogenazione dell'anidride carbonica).

Se ottenuto dal gas, quel che rappresenta la maggioranza dei casi, il costo di produzione riflette in larga parte quello della materia prima ed aumenta in base al contenuto energetico; la sua economicità migliora se il *feedstock* di partenza è il carbone che, tuttavia, presenta uno svantaggio relativo in termini di emissioni di gas ad effetto serra. Se prodotto da idrogeno o da anidride carbonica può considerarsi un combustibile pulito ma il costo di produzione è significativamente più elevato.

Il metanolo è un componente alto ottanico e, anche se il suo impiego primario è nell'industria chimica, può essere usato per la produzione di *fuel* alternativi in miscela con la benzina in diversi rapporti².

Ha un potere calorifico inferiore a quello della benzina, ma questa proprietà peggiorativa sul versante dei consumi è in realtà compensata dalla maggiore densità e dalle ottime proprietà in combustione che, assieme al più alto numero di ottano, consentono di aumentare l'efficienza di rendimento del motore.

Nel trasporto marittimo, la domanda di metanolo come carburante è attualmente molto contenuta, limitata prevalentemente ad aree geografiche caratterizzate da una significativa produzione³ e all'utilizzo in motori *dual-fuel* (diesel- metanolo).

² La Cina in quanto principale produttore e consumatore di metanolo al mondo, ha formulato due standard nazionali - M15 e M85 - che prevedono percentuali di metanolo pari a rispettivamente il 15% e l'85%.

³ 2014: La società Wärtsilä, leader mondiale nel settore dei motori marini e generatori di potenza ad alimentazione diesel, nel suo stabilimento di Trieste, ha modificato e testato un motore marino in condizioni *Dual-Fuels* (diesel - metanolo) senza registrare alcuna perdita di efficienza del motore e con bassissimi livelli di emissioni inquinanti.

2015: la società di traghetti svedese STENA ha retrofittato a *Dual-Fuels* metanolo/LSMGO i motori della nave passeggeri "Stena Germanica" (240 metri di lunghezza, 300 auto e 1300 passeggeri), in servizio nel Mar Baltico; prima nave commerciale al mondo ad utilizzare metanolo come carburante principale.

2016: Waterfront Shipping ha varato sette navi da 50.000 tonnellate di stazza per il trasporto di prodotti chimici e petroliferi con motori *Dual-Fuels* (metanolo e diesel).

5. Powertrain ibridi (motore termico con combustibile petrolifero 0,5% accoppiato a un motore elettrico)

Questa opzione è adottata su meno dell'1% del naviglio esistente, essendo utile e più adatta per navi che svolgono servizi brevi con frequenti cicli di accelerazione - quali traghetto, vaporetto e nautica da diporto - e in generale nei casi in cui il consumo di elettricità (per i servizi di bordo) diventa importante rispetto al consumo energetico complessivo (ad esempio per crociere o per navi con impianti di refrigerazione).

In questi casi, il funzionamento del motore elettrico, con relativa batteria, supporta quello termico nei regimi di transitorio - giungendo ad emissioni locali nulle nei luoghi più sensibili - e per una parte importante dei servizi di bordo.

Si tratta di una soluzione ampiamente abbracciata dal mondo *automotive* a partire dal 2020 - seppure già ben nota ed in parte presente nei due decenni precedenti - e quindi adatta a generare economie di scala in produzione e manutenzione, nonché competenze diffuse anche a possibile beneficio di tali imbarcazioni.

Nella maggioranza dei casi, però, le navi svolgono servizi durante i quali il motore termico lavora a regime e con un rendimento massimo - prossimo al 50% - per quasi tutta la durata della navigazione, molto più estesa che nei casi precedentemente citati.

I periodi di funzionamento a rendimento minore sono di limitata rilevanza (es. manovre, fasi di avvicinamento ed approdo ai porti) e comunque non sufficienti a giustificare l'ibridizzazione estesa dei *powertrain*.

Inoltre, sul medio-lungo raggio, le navi impostano una velocità di navigazione a nodi pressoché costanti e il ricorso a sistemi ibridi non comporterebbe un beneficio rilevante in termini di emissioni di anidride carbonica. Risulta quindi una tecnologia appropriata ed interessante per ambiti specifici.

6. E-fuels

Sono combustibili di sintesi ottenuti dall'idrogeno ("verde" e "blu"), a sua volta prodotto (alias isolato) tramite elettrolisi dell'acqua, utilizzando elettricità da fonti rinnovabili ed anidride carbonica catturata da impianti industriali o direttamente dall'aria.

Questa tipologia di combustibili presenta indubbi vantaggi ambientali rispetto al loro equivalente fossile, in quanto consente un abbattimento potenziale della CO₂ lungo l'intero ciclo di vita del 70% (85-96% nella fase Well to Tank -WTT).

Avendo una densità energetica ben superiore a quella delle batterie, possono inoltre trovare applicazione laddove l'alternativa del motore elettrico non è sempre percorribile, come nel caso delle navi che operano su distanze medio-lunghe.

Alcuni e-fuels (ad esempio l'e-diesel) sono poi idrocarburi puri dal punto di vista chimico e possono quindi essere impiegati nei trasporti senza alcun adattamento al design del motore in quanto classificati come combustibili *drop-in*.

In sostanza, rappresentano una soluzione tecnologica in grado di ridurre le emissioni di gas serra senza dover rinnovare la flotta e sfruttando le infrastrutture di trasporto e stoccaggio esistenti (reti gas, pipeline, rete di distribuzione dei carburanti liquidi, stazioni di rifornimento, depositi).

La transizione dalla fase pilota-dimostrativa attuale ad impianti in grado di attivare una produzione su scala commerciale richiede la messa in campo di ingenti investimenti volti a costruire una nuova *value chain* (elettrolizzatori, sistemi di cattura, stoccaggio e utilizzo dell'anidride carbonica - CCS/U, impianti di conversione).

Serve, inoltre, un deciso aumento della capacità di generazione elettrica da fonti rinnovabili, in considerazione dell'intrinseca inefficienza di conversione che caratterizza questo genere di produzioni.

1. Ammoniaca

L'opzione di un *powertrain* navale che utilizza un motore a combustione per ammoniaca - eventualmente ma non necessariamente abbinato ad un motore elettrico equipaggiato di batteria - riguarderà verosimilmente il lungo periodo (2030-2050), ma sembra rappresentare un'alternativa interessante per il naviglio che opera su lunghe distanze; tale soluzione è tuttavia ad oggi inesplorata in termini applicativi.

L'ammoniaca è un composto di azoto con formula chimica NH_3 , caratterizzato da un'alta concentrazione di idrogeno e quindi di energia (a parità di volume e pressione c'è più idrogeno in un litro di ammoniaca, che in un litro di idrogeno). Si presenta come un gas incolore, tossico, dall'odore pungente caratteristico, in grado di diventare liquido ad una temperatura di circa $-77^\circ C$ (solidificazione) e gassoso a $-33^\circ C$ (liquefazione) e può essere sintetizzato da due degli elementi più comuni sulla Terra: l'azoto dell'aria e l'idrogeno dell'acqua (o del metano).

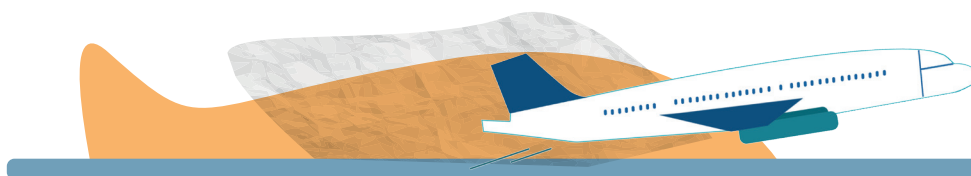
La spinta verso l'ammoniaca invece che verso l'idrogeno - che potrebbe apparire un'opzione da soppesare dati gli sviluppi che a tendere riguarderanno il trasporto stradale, già sperimentati anche per mezzi pesanti e treni su linee prive di elettrificazione - è data principalmente dal fatto che il settore marittimo necessita di combustibili facilmente trasportabili e facilmente mantenibili allo stato liquido per lunghi periodi di tempo (40-45 giorni di navigazione).

L'ammoniaca non contiene carbonio, è stabile a temperatura ambiente e può essere stoccata in forma liquida in condizioni normali di pressione con la sola azione termica; quando serve è ritrasformabile in nuova elettricità, attraverso la sua combustione in motori, turbine o celle a combustibile.

Per contro, l'idrogeno, se impiegato allo stato gassoso, richiederebbe una disponibilità di spazio da destinare ai serbatoi di contenimento quasi superiore rispetto a quella necessaria per il carico della nave stessa, a parità di autonomia richiesta; questo per evitare continui fermi e rifornimenti. Se lo si utilizza allo stato liquido, va mantenuto ad una temperatura di $-250^\circ C$, condizione molto difficile da realizzare dal punto di vista tecnico, oltre che energeticamente dispendiosa: ancor di più per un mezzo di trasporto che non può evidentemente beneficiare di una connessione diretta ad una rete elettrica. Per queste ragioni, nel trasporto marittimo, l'ammoniaca sembra un'opzione preferibile rispetto all'idrogeno in carenza o diniego di combustibili fossili. Può anche essere vista come combustibile da porre in alternativa al metano, eventualmente in motori termici tradizionali *dual-fuel*.

Con l'obiettivo di traguardare una riduzione delle emissioni molto ambiziosa all'orizzonte 2050, sarà necessario orientarsi sulla produzione di ammoniaca sintetica (e-ammoniaca) impiegando elettricità da fonti rinnovabili, quel che apre a barriere di tipo tecnologico e infrastrutturale simili a quelle che caratterizzano la produzione di e-fuels.

Trasporto aereo



Le opzioni

1. **Jet fuel (jet cherosene/benzina avio)** – motori a reazione o a getto¹ (in particolare a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio e per piccoli velivoli);
2. **Sustainable Aviation Fuel (SAF) di tipo HVO/HEFA** (in miscela con jet fuel) - motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche);
3. **Sustainable Aviation Fuel (SAF) diversi da HVO/HEFA** (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche);
4. **Powertrain ibridi - Jet fuel (jet cherosene/ benzina avio)** - motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina;
5. **Idrogeno** – *fuel cell* (o eventualmente motore a turbina) che alimentano motore elettrico.

¹ Più precisamente si tratterebbe di motori a reazione o motori a getto. Includono propulsori a **turbogetto**, a **turboventola**, **statoreattori**, **pulsoreattori** e ad **idrogetto**. In generale, la maggior parte dei propulsori a getto sono motori a combustione interna.

1. Jet fuel fossile (jet cherosene/ benzina avio)

Il JET A-1 è un carburante per aviazione noto come cherosene; è uno dei prodotti derivati dai processi raffinazione del greggio, a seguito dei quali viene miscelato con piccolissime quantità di additivi che, tra le altre cose, svolgono una funzione antidetonante, evitano la formazione di depositi nella turbina o ancora prevengono il suo congelamento, considerando che la temperatura dell'aria in quota è spesso inferiore ai 30°C (-22°F).

Il **Jet A-1** risponde a severi requisiti internazionali, tra cui lo standard internazionale ASTM¹ D1655 e le specifiche F-35 della NATO². Ha un punto di infiammabilità minimo di 38° C e un punto di congelamento massimo di -47° C. Il jet cherosene è adatto alla maggior parte dei velivoli equipaggiati con **propulsori turbofan (motore a getto) o turboelica**.

I motori aeronautici più utilizzati per gli aerei civili di grosse dimensioni sono i turbofan, dove l'aria esterna viene aspirata da una presa d'aria anteriore e compressa attraverso un compressore a più stadi che la porta alla camera di combustione. Il flusso dei gas espulsi dalla camera di combustione fa ruotare ad alta velocità le turbine che sono collegate a loro volta ad una grande ventola anteriore, la quale genera gran parte della spinta. Per tratte lunghe – alta velocità ed alta quota – l'impiego di motori turbofan è decisamente più indicato rispetto alla propulsione ad elica dove la velocità rappresenta un limite.

Sulle brevi tratte di tipo regionale, invece, il motore turboelica (o turboprop) permette risparmi considerevoli in termini di consumo rispetto ad un turbofan e lo svantaggio legato alla minore velocità si fa sentire in maniera limitata. Si parla di tratte che, tra l'altro, si adattano molto bene alle caratteristiche prestazionali di questi propulsori che esaltano le prestazioni di decollo e salita del velivolo in

tempi brevi, con una significativa riduzione anche delle distanze di decollo e la possibilità di operare presso aeroporti con piste di limitata lunghezza. È questo il campo naturale di utilizzo, dove i turboprop rappresentano la scelta migliore.

La **benzina avio**, altrimenti nota come Avgas (Aviation gasoline), viene utilizzata come carburante solo negli aerei equipaggiati con motori a pistoni: prevalentemente piccoli velivoli destinati alla scuola e al turismo o comunque ad attività per cui siano sufficienti piccole potenze (inferiori a 800 cavalli vapore - hp).

La benzina avio ha una pressione di vapore minore e più uniforme rispetto alla benzina per auto, il che le permette di rimanere allo stato liquido ad alta quota, prevenendo il fenomeno indesiderato del *vapor lock*, il blocco del flusso di carburante causato da bolle nei condotti di alimentazione.

Le miscele utilizzate attualmente sono le stesse inizialmente sviluppate negli anni Cinquanta/Sessanta e gli alti numeri di ottano sono ottenuti mediante l'aggiunta di piombo tetraetile (*tetra-ethyl lead* - TEL), una sostanza altamente tossica eliminata dal carburante per le auto nella maggior parte dei paesi durante gli anni Ottanta e Novanta. Ad oggi, l'unico tipo di benzina avio disponibile è la Avgas 100 LL (dall'inglese 100 "low lead" - basso contenuto di piombo), rispondente allo standard ASTM D910.

2. SAF di tipo HVO/HEFA

Ad oggi, il processo di produzione di SAF più maturo – quindi potenzialmente più prossimo ad una commercializzazione rilevante - è noto come HEFA (esteri idroprocessati di acidi grassi). Certificato dall'ASTM nel 2011, impiega come *feedstock* oli vegetali e grassi di scarto che, dopo una prima fase di deossigenazione, vengono sottoposti a idrogenazione (in luogo dell'esterificazione che invece caratterizza la produzione di diesel da biomassa). Sono processi caratterizzati da rese mediamente elevate, dove il 90% del *feedstock* viene convertito in prodotto. L'output finale è costituito da idrocarburi paraffinici a catena dritta privi di composti

¹ American Society for Testing Materials.

² Gli aerei militari della NATO usano lo stesso tipo di jet cherosene ma impiegano alcuni additivi speciali (si parla in questo caso di Jet Propellant 8 -JP-8).

aromatici, ossigeno e zolfo e caratterizzati da alti numeri di cetano, con tassi di miscelazione con i combustibili fossili che possono arrivare al 50%. Il processo di conversione oleochimica che porta alla produzione di fuel di tipo HEFA è simile a quello da cui si ottiene l'olio vegetale idrotrattato (*Hydrotreated Vegetable Oil* - HVO), meglio noto come diesel rinnovabile, con l'aggiunta di ulteriori processi di hydrocracking per ottenere prodotti compatibili con il jet fuel.

Anche la tecnologia utilizzata per la produzione di HVO consente di ottenere come coprodotti idrocarburi impiegabili come jet fuel (mediamente il 25% delle rese).

Tuttavia, gli impianti oggi esistenti tendono ad essere focalizzati sul diesel rinnovabile per autotrazione, in ragione di una domanda tipicamente più sostenuta. Fa eccezione l'impianto di AltAir in California che nel 2016 è diventato la prima *facility* interamente dedicata alla produzione di biojet HEFA.

3. SAF diversi da HVO/HEFA: carburanti sintetici

Le tecnologie di produzione diverse da HVO/HEFA sono raggruppabili in 4 *pathways*, limitando l'analisi a quelli che ad oggi hanno già ottenuto la necessaria certificazione ASTM. Si tratta di processi produttivi perlopiù ancora in fase dimostrativa. Di seguito una sintetica descrizione di quelli ad oggi certificati rientranti nel novero dei processi termochimici.

- **Cherosene paraffinico sintetico - Fischer-Tropsch.** I *feedstock* utilizzati – residui agricoli, colture energetiche e rifiuti solidi urbani (*Municipal Solid Waste* – MSW) - subiscono un processo di gassificazione a seguito del quale i gas sintetici ottenuti vengono trasformati (Fischer-Tropsch) in idrocarburi liquidi, successivamente raffinati. Il prodotto finale può essere miscelato fino al 50% con il fuel fossile.
- **Cherosene paraffinico sintetico - Power to Liquids (PTL o e-fuel).** Rispetto al precedente, i gas di sintesi possono essere prodotti a partire da idrogeno ottenuto da

elettrolisi dell'acqua (usando elettricità rinnovabile) combinato con anidride carbonica catturata; successivamente vengono trasformati in idrocarburi liquidi (Fischer-Tropsch) e sono impiegabili in miscela con l'equivalente fossile fino al 50%.

- **Cherosene paraffinico sintetico - Alcohol to Jet (ATJ).** Attraverso un processo di fermentazione, zuccheri, amidi o cellulosa idrolizzata vengono convertiti in alcool (isobutanolo o etanolo) che – in quanto molecola intermedia - viene poi ulteriormente processato (deidratazione e oligomerizzazione) al fine di ottenere idrocarburi liquidi sintetici. Anche in questo caso, il prodotto finale è miscelabile fino al 50%.
- **Isoparaffine sintetiche (SIP).** È un processo di conversione diretta degli zuccheri che impiega la fermentazione per ottenere farnesene ($C_{15}H_{24}$), una molecola con catena di carbonio lunga e quindi più simile agli idrocarburi distillati rispetto ai prodotti che si ottengono dalla fermentazione alcolica; dopo opportuno *upgrading*, il farnesene ($C_{15}H_{32}$) può essere usato come carburante *drop in*, ma con un tasso di miscelazione più basso dei precedenti e fino al 10%.

Powertrain ibridi – Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) con motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina

Nei *powertrain* ibridi i motori a turbina vengono utilizzati per la produzione di energia elettrica e per ricaricare le batterie, le quali possono fornire la propulsione necessaria durante diverse fasi di volo (ritiro dei carrelli, luci, aria condizionata). Rappresentano una **tecnologia promettente per i voli a corto-medio raggio.**

Un indubbio vantaggio deriva dalla loro **scalabilità** che permette una penetrazione graduale, partendo da velivoli a 1-2 posti già oggi in esercizio, fino alla loro potenziale applicazione in aerei che ospitano 50-100 passeggeri in un orizzonte di più lungo periodo.

5. Idrogeno – fuel cell (o eventualmente motore a turbina) che alimentano un motore elettrico

Per gli aerei *full electric*, ad oggi esistono alcuni prototipi di velivoli alimentati a idrogeno, tipicamente di piccole dimensioni e/o senza pilota, che funzionano attraverso la combinazione di celle a combustibile a idrogeno con un sistema a propulsione distribuita per aerei elettrici, quel che di fatto supera le prestazioni offerte dalle batterie al litio, sia in termini di sicurezza che di autonomia energetica del velivolo.

Come per i *powertrain* ibridi, la tecnologia è scalabile e il primo step potrebbe riguardare l'utilizzo a bordo di sistemi ausiliari alimentati da celle a combustibile ad idrogeno. Tra questi sembrano di possibile realizzazione l'APU (Auxiliary Power Unit), il sistema di retrazione

dei carrelli di atterraggio, il sistema di condizionamento dell'aria, il sistema anti-ghiaccio delle superfici portanti. Tra i progetti in corso, quello della start-up statunitense ZeroAvia, pensato per il trasporto di 10-20 passeggeri su rotte regionali, sarà potenzialmente disponibile a metà del decennio 2030. Ancora, il progetto RAPID-200-FC, messo a punto dal Politecnico di Torino, ha un sistema propulsivo da 40 kW interamente elettrico: la potenza all'elica è fornita da celle a combustibile ad idrogeno gassoso da 20kW.

Per garantire l'assoluta sicurezza delle operazioni di volo, l'aereo dispone anche di una seconda fonte di energia costituita da un pacco batterie al litio da 20 kW in grado di garantire potenza supplementare o alternativa durante il decollo e la salita iniziale. L'alimentazione del motore elettrico avviene tramite generazione di corrente ad alto potenziale in un sistema di ionizzazione e ricombinazione dell'idrogeno.

Trasporto stradale



Le opzioni

1. Motori a combustione interna (MCI) con propulsione ibrida leggera (*mild hybrid*) – la presenza di un alternatore/starter reversibile consente di recuperare energia in frenata e di fornire potenza addizionale al motore termico in determinate fasi di marcia). Tra i combustibili impiegati in questo ambito si confrontano:

- a. **benzina/gasolio tradizionali** (da Euro 6 in avanti; Euro 6d e 6d-Temp), con eventuale crescente ricorso a **biocarburanti** (specie avanzati) e, a tendere, a **carburanti sintetici quali gli e-fuels**;
- b. **gas di petrolio liquefatto (GPL)**, spesso in modalità bi-fuel con carburanti tradizionali;
- c. **metano, in forma compressa (GNC), liquida (GNL)** – specie per veicoli pesanti con percorrenze medio-elevate – e nella sua accezione rinnovabile (biometano/bio-GNL).

2. Powertrain a trazione mista (ibrida) oppure solo elettrica, nelle diverse declinazioni:

- a **Hybrid Electric Vehicles (HEV)**, veicoli con *powertrain* ibridi in serie e in parallelo, nei quali le batterie si ricaricano solo durante la marcia (o comunque l'accensione del motore) e dove sono presenti sia un motore elettrico sia un MCI la cui alimentazione avviene attraverso i carburanti petroliferi tradizionali, eventualmente in miscela con biocarburanti, o – nel lungo periodo – con carburanti sintetici. Questi veicoli, come i PHEV, rientrano nella categoria *full hybrid* nei quali può essere il motore elettrico (lo diviene necessariamente se l'ibridizzazione è in serie) a fornire la potenza utile per la trazione.

b Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEV), veicoli ibridi nei quali le batterie si ricaricano, oltre che dal motore termico ed in fase di frenatura (rigenerativa), anche tramite la rete elettrica, in genere con veicolo fermo (ricarica statica conduttiva o eventualmente induttiva, entrambi esistenti) ma, eventualmente, anche in movimento (ricarica induttiva in movimento, *charge while driving*, oggi sperimentale). Anche in questo caso, è presente sia un motore elettrico sia un MCI, alimentato da carburanti tradizionali (eventualmente in miscele bio) o dai loro equivalenti sintetici. La trazione può avvenire sia in forma ibrida sia impiegando solo il motore elettrico, in genere per distanze dell'ordine di 50-70 km. Distanze maggiori, in generale, non servono e possono al contempo penalizzare volumetria e massa del veicolo, a scapito del rendimento e di spazi utili.

c. Battery Electric Vehicles (BEV), veicoli completamente elettrici con motore alimentato a batteria. In questa categoria rientrano veicoli a trazione elettrica con diverse modalità di alimentazione o ricarica a seconda del segmento di trasporto stradale considerato: da mezzi a batteria ricaricata tramite presa elettrica a quelli, come nel caso del TPL, nei quali la ricarica avviene senza necessità di accumuli elettrochimici importanti perché alimentati in modo continuo in esercizio tramite un contatto con una linea di alimentazione (cavo sospeso o rotaia protetta); un esempio molto noto sono i filobus, alimentati tramite una doppia linea aerea sospesa sulla sede stradale; anche la ricarica in movimento è contemplata nella configurazione *Charge While Driving (CWD)*; gli autobus elettrici con ricarica plug-in o induttiva (ed eventuale biberonaggio) sono un'ulteriore opzione già sperimentata; nel caso del trasporto pesante, i veicoli BEV analizzati riguardano quelli alimentati da linee elettriche autostradali o con modalità *Charge While Driving (CWD)* e i veicoli elettrici con ricarica induttiva o plug-in.

3. Motori elettrici con fuel cell ad idrogeno: l'idrogeno può bruciare in un motore a combustione interna, ed in questo caso si parla di HICEV - Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle), oppure si può provocare una reazione con l'ossigeno in una pila a combustibile, producendo così elettricità da utilizzare in un motore di trazione elettrico. In questo caso si parla di **FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle**.

1. Benzina/gasolio – MCI

Gli sforzi economici e tecnologici degli ultimi anni si sono concentrati sull'avanzamento della qualità di benzina e gasolio per autotrazione, con un duplice obiettivo: il contenimento dei consumi e un miglioramento continuo delle emissioni inquinanti. Nell'Unione europea, la competenza in materia di normazione tecnica sulla qualità dei combustibili ricade sul CEN (Comitato Europeo di Normazione) che – in collaborazione con enti normativi nazionali e sovranazionali – definisce e aggiorna attraverso norme tecniche, ovvero “specifiche”, le caratteristiche minime necessarie che i carburanti devono avere per il corretto funzionamento dei motori, per il contenimento delle emissioni inquinanti e per la sicurezza nella distribuzione.

L'aggiornamento delle norme è effettuato periodicamente per tenere conto delle progressive restrizioni ai parametri di qualità e dell'evoluzione dei combustibili (in primo luogo per l'introduzione dei biocombustibili). In merito alla **benzina senza piombo**, la norma europea UNI EN 228 – la cui ultima edizione è stata pubblicata a metà 2017 (EN 228:2012+A1:2017) specifica i requisiti e i metodi di prova per la benzina utilizzata nei veicoli con motore ad accensione comandata.

Tra i requisiti di qualità elencati, il numero di ottano¹ è senza dubbio uno dei parametri più importanti: sia per il costruttore di motori, che deve metterli a punto in modo da evitare l'insorgenza del fenomeno della detonazione, che per la raffineria, la quale deve produrre una benzina in grado di “bruciare” regolarmente

¹ Esistono due metodi per determinare il numero di ottano di una benzina, sviluppati dal Cooperative Fuel Research (ASTM, USA) negli anni '30: il metodo RESEARCH (RON) che si correla con la tendenza della benzina a detonare in condizioni di basso regime di rotazione e in accelerazione, e il metodo MOTOR (MON) che si correla con la tendenza della benzina a detonare in condizioni di elevati regimi di rotazione a carico elevato. Per entrambi in Europa il limite di minimo in specifica è pari a 95,0 e 85,0 rispettivamente per il RON e per il MON. Interessante osservare come questi parametri siano evoluti nel corso del tempo: l'aumento è stato graduale fino al “salto” di circa 10 punti di numero di ottano nel 1987, reso necessario con l'introduzione della benzina senza piombo. Per maggiori dettagli si rimanda a “La normazione dei combustibili per autotrazione: oltre cento anni di storia”, A cura di Davide Faedo Innovhub - Divisione Stazione Sperimentale per i Combustibili - CT “Prodotti petroliferi e lubrificanti” UNICHIM - Ente Federato all'UNI

nel motore in tutte le sue possibili condizioni di funzionamento. Un passaggio fondamentale del processo di revisione della norma CEN risale al 2012: in quell'anno venne effettuato un aggiornamento della specifica in seguito alla pubblicazione della direttiva 2009/30/CE relativa alla qualità della benzina e del combustibile diesel. È stata così introdotta la possibilità di miscelare (bio)etanolo in benzina fino al 10% in volume (E10), innalzando di conseguenza il tenore massimo di ossigeno al 3,7% in massa.

Per il diesel, la norma europea EN590 – la cui ultima edizione è stata pubblicata dal CEN a maggio 2017 – specifica i requisiti e i metodi di prova per il gasolio per autotrazione per motori diesel. Il numero di cetano è sicuramente una delle principali caratteristiche legate alla qualità del gasolio: ne indica la facilità di accensione per compressione e influenza l'avviamento a freddo del motore, le emissioni inquinanti e il rumore di combustione.

L'attuale limite minimo a 51 garantisce una combustione regolare e di conseguenza minori emissioni inquinanti per motori che sono stati messi a punto per funzionare regolarmente con tale combustibile. In commercio si trovano anche gasoli denominati “high performance”, che hanno come caratteristica (tra le altre) quella di avere un numero di cetano superiore a 51, garantendo in questo modo una combustione ancora più efficiente.

Uno degli effetti più evidenti raggiunti nel tempo è la drastica riduzione del contenuto di zolfo – di 200 volte in 20 anni – passando da 2000 mg/kg a 10 mg/kg: questo ha determinato una drastica riduzione dei solfati che si formano durante la combustione del gasolio nel motore e di conseguenza una diminuzione dell'emissione del particolato nei gas di scarico.

Si è ridotta anche l'emissione di anidride solforosa e di acido solforico, responsabili della formazione di particolato secondario in atmosfera. La riduzione del tenore di zolfo consente inoltre di mantenere elevata e più a lungo l'efficienza dei dispositivi catalitici per l'abbattimento delle emissioni (catalizzatori De-NO_x, filtri antiparticolato), sensibili per l'appunto alla presenza di

zolfo. Requisiti importanti per il gasolio da auto-trazione sono, inoltre, le sue proprietà a freddo, rappresentate dalla temperatura alla quale il carburante comincia ad intorbidire e ad opporre maggiore resistenza allo scorrimento all'interno di un determinato filtro. Per questa ragione la specifica di riferimento EN 590 prevede la presenza durante il periodo invernale in alcune zone di gasolio chiamato "artico", pienamente efficiente fino a temperature di -21°C.

L'introduzione di un limite massimo del contenuto di FAME (biodiesel), inizialmente del 5% in volume (B5) e poi successivamente aumentato al 7% (B7) è una delle misure prese dalla Commissione per introdurre l'impiego di biocombustibili e per ridurre l'emissione di anidride carbonica direttamente associabile alla combustione (*Tank to Wheel* - TTW). Con l'aggiunta di FAME occorre fare attenzione al rischio di contaminazione batterica del gasolio in quanto la percentuale di biodiesel potrebbe portare con sé sia "substrato vivente" sia acqua, permettendo una molto rapida riproduzione di batteri e microorganismi.

Biocarburanti (in miscela con benzina e gasolio fossile) – MCI

Dalla fermentazione di colture amidacee zuccherine come canna da zucchero, barbabietola e mais si ottiene il **bioetanolo di prima generazione da miscelare con la benzina**. Le fonti utilizzate per la produzione dei biocarburanti avanzati sono invece le biomasse derivanti da residui agricoli o da colture energetiche non alimentari, quindi meno soggette agli impatti indiretti derivanti dal cambiamento nell'uso del suolo (rappresentati dalle cosiddette emissioni ILUC).

I processi di produzione vanno dall'utilizzo di specifici microrganismi, impiegati per estrarre zuccheri sottoprodotti dalle biomasse iniziali, a processi biochimici, utilizzati per trasformare i residui in liquidi e successivamente in gas. Attualmente è disponibile su scala industriale la tecnologia per convertire biomasse lignocellulosiche in **bioetanolo avanzato** utilizzabile in

miscela con la benzina, elevandone notevolmente il numero di ottano ed in grado di ridurre le emissioni di anidride carbonica (*Well to Wheel* - WTW) fino al 90-100% rispetto al carburante fossile. Il bioetanolo può essere utilizzato in miscela nelle benzine a percentuali che possono variare dal 5% al 10% in volume. I veicoli di nuova costruzione sono ormai tutti compatibili con miscele fino al 10% mentre lo stesso non può dirsi per tutti quelli in circolazione.

È disponibile sul mercato anche un prodotto denominato E85 che contiene etanolo fino all'85% in volume ed è destinato solo a veicoli adattati allo scopo. L'etanolo può anche essere impiegato per produrre ETBE, componente molto utile per la formulazione delle benzine essendo altottanico e perfettamente compatibile con la parte fossile. Il bioetanolo è attualmente poco impiegato in Italia essendo l'obbligo sui biocarburanti quasi interamente assolto con il biodiesel.

Le specifiche tecniche CEN che regolamentano l'uso di (bio)etanolo nei motori a benzina sono le seguenti:

- EN 228 E5/E10 per miscele di (bio)etanolo nella benzina fino al 5% e fino al 10% in volume
- EN 15293 – E85 per miscele di (bio)etanolo nella benzina fino all'85% in volume
- EN 15376 per la qualità del (bio)etanolo da impiegare nelle suddette miscele.

Il biodiesel di prima generazione si ottiene invece dalla transesterificazione di olio vegetale - come olio di palma, colza o soia, i cui principali produttori sono ubicati in Indonesia e Malesia - con alcol etilico o alcol metilico (FAME), riproducendo le caratteristiche chimico-fisiche e prestazionali del gasolio minerale, con il quale viene miscelato ed utilizzato nei moderni motori diesel. Il biodiesel può essere utilizzato in miscela a varie percentuali: miscele fino al 7% (B7) o al 10% (B10) in volume possono essere vendute sulla rete dei punti vendita esistente mentre blend con contenuti superiori - dal 20 al 30% in volume - possono essere venduti in extra-rete previo accordo tra venditore ed uti-

lizzatore. Questa condizione è necessaria anche nel caso di impiego del biodiesel tal quale, al 100%, limitato a flotte *captive*. Le specifiche tecniche che regolamentano l'uso del biodiesel nei motori diesel sono le seguenti:

- EN 590 - B7 - Miscela biodiesel/gasolio fino al 7% in volume;
- EN 16734 - B10 - Miscela biodiesel/gasolio fino al 10% in volume;
- EN 14214 - Qualità biodiesel per miscele in gasolio a qualsiasi percentuale;
- EN 16709 - B20/B30 - Miscela biodiesel/gasolio fino al 30% in volume.

Il **biodiesel avanzato è invece** ottenuto a partire da biomasse derivanti da residui agricoli o da colture energetiche non alimentari, quindi meno soggette agli impatti indiretti derivanti dal cambiamento nell'uso del suolo (ILUC). Vi sono poi **diesel paraffinici sintetici**, indicati con la sigla "XTL/HVO", dove XTL è un termine che descrive genericamente un combustibile liquido ottenuto mediante processo Fischer-Tropsch a partire da gas naturale (GTL "Gas to Liquid"), biomassa (BTL "Biomass to Liquid") o carbone (CTL - "Coal to liquid"), mentre con **HVO (Hydrotreating of vegetable oils)** si intende il processo di idrogenazione di oli vegetali.

È una trasformazione degli oli alternativa al processo di produzione del biodiesel (FAME), con la particolarità che il processo HVO consente di avere un gasolio ad alto cetano, privo di zolfo ed aromatici, ottima stabilità, virtualmente indistinguibile dal gasolio fossile e pertanto perfettamente miscibile con esso. Il processo viene effettuato all'interno di impianti dedicati, oppure miscelando l'olio vegetale al diesel fossile nei reattori di idrodesolforazione delle raffinerie (in questo caso si parla di *co-feeding*).

È la norma europea EN 15940 – Gasolio paraffinico ottenuto da sintesi o idrotrattamento, approvata per la prima volta nel 2016 con ultimo aggiornamento nel 2019 - che definisce la qualità per il combustibile diesel ottenuto da gas di sintesi (partendo da gas naturale, carbone o biomassa) o da oli vegetali mediante idrogenazione. Il gasolio paraffinico può essere utiliz-

zato come componente di miscela in gasolio e non ha limitazioni (a patto che la miscela finali rispetti i requisiti della norma EN 590): tuttavia, la norma si occupa di definirne la qualità solo per l'uso tal quale.

Le principali differenze tra il gasolio paraffinico e il gasolio per autotrazione a specifica EN 590 sono la densità, lo zolfo, il tenore di aromatici e il numero di cetano. Un gasolio paraffinico è praticamente privo di zolfo e di composti aromatici; la sua natura paraffinica è infatti "comprovata" limitando all'1% il contenuto della componente aromatica.

Per quanto riguarda il numero di cetano sono state definite due classi, una delle quali avente una qualità di accensione decisamente migliore rispetto al normale gasolio: il limite minimo è infatti 70 contro il 51 del gasolio a specifica EN 590. La norma prevede anche la miscelazione di gasolio paraffinico con biodiesel (FAME), consentendo fino al 7,0% (v/v).

Gas di petrolio Liquefatto (GPL) – MCI (tipicamente bi-fuel)

Il Gas di Petrolio Liquefatto è una miscela di idrocarburi alcani a basso peso molecolare; viene estratto da giacimenti naturali di gas oppure si ottiene mediante lavorazione del greggio durante il processo di raffinazione del petrolio. Il suo nome deriva dal fatto che i suoi componenti – principalmente propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}) - originariamente sono in fase gassosa a temperatura ambiente e pressione atmosferica, e successivamente vengono liquefatti mediante compressione per rendere più economico il loro trasporto. Ha un potere calorifico non distante da quello della normale benzina, con buone doti antidetonanti.

Il GPL, quale combustibile per autotrazione, fa riferimento alla norma UNI EN 589 "Combustibili per autotrazione - GPL - Requisiti e metodi di prova". Nel medio-lungo periodo, dovrebbe emergere anche il bio-GPL ottenuto da biomassa se le tecnologie di produzione diventeranno sostenibili anche sotto il profilo economico. Ad oggi viene prodotto in quantitativi molto pic-

coli nei processi di produzione dell'HVO e nel co-processing di idrogenazione di oli vegetali e carica petrolifera.

I veicoli a GPL possono di regola essere dotati di una doppia alimentazione (bi-fuel): possono quindi viaggiare sia con l'alimentazione a benzina¹ che con quella a GPL.

Gas naturale compresso (GNC) MCI (tipicamente bi-fuel)

Il gas naturale viene generalmente trasportato e distribuito, per gli usi civili ed industriali, in una rete magliata e interconnessa mediante condotte aventi pressioni variabili tra gli 0,04 bar fino ad oltre 70 bar.

Per l'uso autotrazione, viene prelevato dalla rete e tipicamente compresso allo stato gassoso fino a 20000 kPa. In Italia, le specifiche richieste al gas naturale per autotrazione sono redatte dalla Commissione CUNA² "Combustibili, lubrificanti e affini" che elenca e fornisce l'intervallo di valori dei parametri d'interesse e cioè le indicazioni per il potere calorifico (superiore e inferiore), la massa volumica, la composizione e lo zolfo totale.

Un ulteriore parametro di rilievo per l'uso autotrazione ed è il Numero di Metano (MN) cioè il valore numerico che caratterizza il potere detonante di un gas combustibile; tale parametro è paragonabile per importanza al numero di ottano per la benzina. Nel 2017 è stata ultimata la stesura della specifica europea EN 16723-2:2017 che definisce i requisiti e i metodi di prova per il gas naturale, il biometano e loro miscele al punto di utilizzo come carburanti per autotrazione.

Il CNG è un combustibile ideale per i motori a combustione interna in quanto caratterizzato da un elevato potere antidetonante naturale, un'ottima miscibilità con l'aria e un ampio intervallo di accensione (brucia in proporzioni variabili di dosatura con l'aria comburente).

¹ Vi sono anche auto a diesel che hanno installato il *dual fuel* e che viaggiano a diesel e GPL, gasolio e metano.

² Commissione Tecnica di Unificazione nell'Autoveicolo.

Gas Naturale Liquefatto (GNL)/ Bio-GNL – MCI

Il GNL è una miscela di idrocarburi costituita prevalentemente da metano (90-99%) e in quantità minori da componenti secondari quali l'etano, il propano e il butano. Il prodotto che ne deriva si presenta come un liquido inodore, trasparente, non corrosivo e atossico con una densità pari a circa la metà di quella dell'acqua e con un elevato potere calorifico.

Il gas naturale diventa GNL dopo trattamenti di purificazione e successiva liquefazione per raffreddamento a - 160°C circa, temperatura a cui viene stoccato a pressione pressoché atmosferica occupando un volume di 600 volte inferiore rispetto al gas naturale da cui ha tratto origine. La sua densità volumetrica rimane comunque significativamente inferiore rispetto a quella del diesel.

Il gas naturale, prima della sua liquefazione per raffreddamento, viene purificato nei paesi produttori dai gas acidi (CO₂ e H₂S) e dagli idrocarburi pesanti (C₅+ e superiori), nonché da una buona parte di etano, propano e butano, in quanto la loro presenza nel GNL è fortemente limitata da ragioni tecniche (per esempio rischi di solidificazione durante il raffreddamento oppure corrosione).

Con il contributo derivante dallo sviluppo del biogas sarà possibile, tramite processi di depurazione e liquefazione, ricavare bio-GNL, del tutto identico dal punto di vista compositivo al GNL "tradizionale".

Biometano (100% o in miscela con GNC) – MCI

Le materie prime principalmente impiegate per la produzione di biometano sono colture agricole, rifiuti e sottoprodotti agricoli e zootecnici, FORSU e altri rifiuti e sottoprodotti.

Dalla digestione anaerobica, grazie alla degradazione della materia organica, in particolare di rifiuti agricoli e zootecnici ad opera di microrganismi in assenza di ossigeno, viene prodotto biogas che viene trasformato attraverso

un processo di upgrading (di rimozione della CO₂) in biometano, adatto all'immissione nelle esistenti infrastrutture di trasporto, stoccaggio e distribuzione di gas. La CO₂ rimossa, di natura biogenica, costituisce inoltre componente utile per successivi processi di metanazione e può concorrere quindi alla produzione di metano sintetico.

Il biometano può essere inoltre prodotto da gassificazione termochimica: in questa tecnologia, la biomassa solida (quali scarti forestali o boschivi, ad esempio), in presenza di una quantità "controllata" di ossigeno, viene trasformata in una miscela di gas (syngas) e successivamente, attraverso un processo di metanazione, viene convertita in metano sintetico.

Attualmente tale tecnologia è marginale rispetto alla digestione anaerobica e non è ancora disponibile su scala commerciale, anche se molto promettente nel medio-lungo periodo soprattutto a livello economico.

Relativamente ai più comuni processi di digestione anaerobica, il biometano presenta un grande potenziale di decarbonizzazione quando prodotto da residui di matrice agricola o da rifiuti (FORSU); questa tipologia, classificabile come biometano avanzato¹, è quella su cui punta la normativa: il suo utilizzo diventa un obbligo nel sistema dei trasporti, costituendone il maggiore driver di sviluppo.

Il biometano è un prodotto perfettamente in linea con il metano fossile per quanto riguarda le caratteristiche qualitative e prestazionali e quindi può essere utilizzato senza alcun ulteriore trattamento in tutti i mezzi alimentati da gas naturale compresso.

Le specifiche tecniche che ne regolamentano l'uso nei motori sono le seguenti:

- Norma EN 16723-1:2016 Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network

¹ Si ricorda che il biometano avanzato è tale se derivante dalla produzione di biogas a partire da determinate matrici, in particolare quelle di cui alla Parte A dell'allegato 3 al DM 10 ottobre 2014 (che di fatto replica l'elenco delle materie utilizzabili contenuto nell'Allegato IX alla direttiva 2009/28/CE includente la frazione biodegradabile dei rifiuti, così come residui e colture di integrazione rispetto alle colture principali).

- Part 1: Specifications for biomethane for injection in the natural gas network.
- Norma EN 16723-2:2017 Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network
 - Part 2: Automotive fuels specification.

E-fuels – MCI

Sono combustibili di sintesi ottenuti dall'idrogeno ("verde" e "blu"), a sua volta prodotto (alias isolato) tramite elettrolisi dell'acqua, utilizzando elettricità da fonti rinnovabili ed anidride carbonica catturata direttamente dall'aria o, molto più convenientemente, da sorgenti concentrate (ad esempio settori industriali ad alta intensità energetica quali raffinerie, cementerie, acciaierie, ecc.).

I prodotti finali sono idrocarburi sintetici di natura gassosa o liquida formulati in modo del tutto simile ai corrispondenti prodotti convenzionali (benzina, diesel, GNC, GNL, ecc.).

Pertanto, le relative specifiche tecniche sono le stesse che il CEN ha definito per regolamentare la qualità dei combustibili di origine fossile corrispondenti.

La produzione degli e-fuels è oggi ancora sperimentale e comporta intrinseche perdite energetiche di conversione termodinamica durante il processo produttivo.

2. Powertrain a trazione mista o solo elettrica

Nella categoria a trazione mista sono considerati i veicoli **HEV (Hybrid Electric Vehicle)** o *full hybrid*, dove il motore elettrico funziona insieme a quello a combustione interna ed è in grado di viaggiare al 100% in modalità elettrica per pochi chilometri (non varie decine come nel caso dei PHEV) grazie alla selezione del tipo di trazione da parte del conducente.

Le batterie si ricaricano nelle fasi di frenata e grazie alla presenza del motore termico, mentre non è presente una presa di corrente per collegarsi a postazioni di carica.

Per i modelli con “spina” bisogna, appunto, passare ai **PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicle)** dove il motore elettrico si ricarica anche con la presa di corrente o eventualmente con una ricarica induttiva (senza contatto fisico) e l'autonomia a zero emissioni sale fino a circa 50-70 chilometri, tipici delle percorrenze urbane giornaliere o di pochi giorni.

In questo caso l'elettrificazione è decisamente maggiore rispetto alle precedenti soluzioni tecnologiche, ad eccezione dei BEV (veicoli solo elettrici), così come sono maggiori i costi di acquisto, data l'elevata flessibilità operativa del veicolo.

I veicoli a trazione mista, essendo dotati di motore a combustione interna in affiancamento ad un motore elettrico (eventualmente due), sono legati al consumo di carburanti liquidi e quindi alle relative future evoluzioni per tutte le percorrenze tipicamente extra urbane o in ambiti dove non siano vincolanti o rilevanti le concentrazioni di sostanze inquinanti locali (sia gassose sia solide in sospensione, come il particolato o PM), vale a dire tipicamente nelle città (al 2050 un veicolo ibrido plug-in potrebbe avere il MCI alimentato da *e-fuels*).

La trazione solo elettrica riguarda invece i cosiddetti **BEV (Battery Electric Vehicle)** dove il motore termico scompare e rimane solo quello elettrico, accoppiato a una batteria di grandi dimensioni.

Sono veicoli caratterizzati da alti costi d'acquisto cui si aggiunge l'ancora ridotta autonomia e le inefficienze della rete di ricarica, fattori difficilmente eliminabili in pochi anni, non essendovi evidenze di *breakthrough* tecnologici per batterie e motori elettrici a breve o medio termine.

La ricarica dei veicoli elettrificati o elettrici viene effettuata attraverso il collegamento del veicolo a una presa domestica connessa ad un impianto elettrico adeguato alla potenza necessaria (maggiore in generale per veicoli BEV, a meno di accontentarsi di ricariche marginali o di poter disporre di tempi di ricarica molto estesi) o ad un'apposita infrastruttura di ricarica pubblica o privata.

3. Idrogeno – Fuel Cell Electric Vehicle

L'idrogeno biatomico (H_2) – semplicemente noto come idrogeno – è abbondante in natura solo in combinazione con altre molecole (come quella dell'acqua o del metano), da cui può essere prodotto utilizzando fonti primarie o secondarie di energia per la scomposizione della molecola più complessa. Le categorie di idrogeno di cui si è soliti parlare – “grigio”, “blu” e “verde” – fanno riferimento ai differenti processi produttivi e non a specifiche “varietà” di idrogeno.

L'idrogeno **grigio** viene prodotto mediante un processo di *steam reforming* del metano (CH_4) tipicamente all'interno di grandi impianti chimici e petrolchimici per soddisfare il consumo interno. Ha quindi un'origine fossile, con elevato impatto in termini emissivi, quel che determinerà la sua progressiva esclusione in termini di impiego nel processo di decarbonizzazione del settore trasporti.

L'idrogeno **blu** ha ugualmente origine nel processo di *steam reforming* del metano, ma la produzione è associata a processi di cattura e stoccaggio del carbonio (*Carbon Capture and Storage, CCS*) che riducono l'emissione in atmosfera di agenti climalteranti. Secondo le stime dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (AIE), la relativa impronta carbonica sarebbe il 10% di quella associata all'idrogeno grigio. Pur non essendo completamente *carbon neutral*, viene considerato come una valida tecnologia “ponte” nella transizione energetica verso un sistema completamente decarbonizzato, almeno per il breve-medio periodo.

La generazione di **idrogeno verde** avviene mediante un processo di elettrolisi dell'acqua alimentato da elettricità interamente generata da fonti rinnovabili, come eolico e solare. All'interno dei *Fuel Cell Electric Vehicles*, l'idrogeno reagisce con l'ossigeno in una cella a combustibile (***fuel cell***) che alimenta un motore elettrico. In questa tecnologia, l'unico scarico è costituito da vapore acqueo: la molecola di idrogeno non contiene infatti atomi di carbonio e il suo uso non genera emissioni di gas climalteranti.