

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA "ENZO FERRARI"

Laurea Magistrale in Ingegneria del Veicolo

Sviluppo preliminare di un layout di una vettura Formula Student a combustione alimentata ad idrogeno

Candidato:
Lorenzo Serafini

Relatore:
Prof. Valerio Mangeruga
Correlatore:
Ing. Andrea Piergiacomì

2024 - 2025

*"Se vuoi qualcosa che non hai mai avuto
devi fare qualcosa che non hai mai fatto"*

Thomas Jefferson

Abstract

La crescente attenzione verso la mobilità sostenibile ha spinto il motorsport ad affrontare la transizione verso vettori energetici alternativi ai combustibili fossili.

In questo contesto si inserisce la presente tesi, che si propone di valutare la fattibilità tecnica della progettazione di una vettura Formula Student con motore a combustione interna alimentato ad idrogeno (H_2 -ICE), in risposta all'introduzione, nel 2024, della nuova categoria idrogeno da parte del regolamento di Formula Student Austria.

Per raggiungere tale obiettivo, il lavoro è stato articolato in due fasi principali. Nella prima fase è stata condotta un'analisi energetica e fluidodinamica del motore Ducati 1299 per stimare i consumi, le portate aria/carburante e l'autonomia necessaria a completare la prova Endurance di 22 km. Sono stati utilizzati calcoli analitici e simulazioni GT-POWER, con l'obiettivo di verificare la compatibilità tra le richieste energetiche del ciclo gara e la quantità di idrogeno stoccabile entro i limiti regolamentari (2 kg a 350 bar).

La seconda fase ha riguardato la progettazione e l'integrazione dell'intero sistema di alimentazione a idrogeno, includendo il dimensionamento dei serbatoi, la selezione dei dispositivi On-Tank, il routing della linea carburante e l'adeguamento del Shutdown Circuit. Tutti i componenti sono stati scelti sulla base di normative tecniche (UN-ECE R134) e vincoli imposti dal regolamento di gara.

I risultati ottenuti dimostrano la fattibilità tecnica della conversione a motore H_2 -ICE, con soluzioni progettuali che garantiscono sicurezza e un'autonomia adeguata. Tuttavia si osserva una riduzione delle prestazioni dinamiche legata principalmente all'impiego di strategie di combustione magra dell'idrogeno e delle limitazioni legate allo stoccaggio del carburante. Il lavoro fornisce comunque una base solida per futuri sviluppi, tra cui l'adozione dell'iniezione diretta ad alta pressione, l'ottimizzazione della combustione e una più avanzata integrazione del sistema nel telaio esistente.

Indice

Introduzione	1
1 Formula Student: dalla competizione al progetto MMR Hydrogen	3
1.1 Introduzione alla Formula SAE	3
1.2 Le prove in gara nella Formula SAE	4
1.2.1 Prove Statiche	4
1.2.2 Prove Dinamiche	5
1.3 La storia di MMR	7
1.4 Aspetti tecnici della vettura Hybrid	9
1.5 Il nuovo regolamento per la vettura a idrogeno	15
1.5.1 Idrogeno e linea carburante	16
1.5.2 Serbatoi di idrogeno e ausiliari	17
1.5.3 Limiti dei veicoli a combustione	18
1.5.4 Gestione della sicurezza per l'idrogeno	19
2 L'idrogeno	21
2.1 Introduzione all'idrogeno	21
2.2 Cenno sulla produzione dell'idrogeno	22
2.2.1 Produzione di idrogeno da idrocarburi	22
2.2.2 Elettrolisi dell'acqua	22
2.3 Storia dei motori a idrogeno	23
2.4 Proprietà dell'idrogeno nei motori a combustione interna	25
2.5 Il rapporto stechiometrico dell'idrogeno	27
2.6 Modalità di iniezione ed emissioni	28
2.7 Lo stoccaggio dell'idrogeno	31
2.7.1 Stoccaggio meccanico (o fisico)	31
2.7.2 Stoccaggio chimico	33
2.8 Vari tipi di serbatoi	34

3	Impostazione del layout della vettura a idrogeno	36
3.1	Scelta del motore	36
3.2	Stima dei Consumi del Motore Ducati 1299 in Configurazione ad Idrogeno	40
3.3	Descrizione del modello GT-POWER	40
3.4	Stima dei consumi attraverso Excel	44
3.5	Scelta delle bombole	51
3.6	Sidepods strutturali	53
3.7	Posizionamento dei radiatori e delle carene	55
3.8	Componenti della linea carburante	58
3.8.1	On Tank Devices (OTD)	60
3.8.2	Connettore a sgancio rapido	61
3.8.3	Collettore	62
3.8.4	Valvola manuale	63
3.8.5	Tubi flessibili e rigidi	64
3.8.6	Sensori di pressione	66
3.8.7	Dischi di rottura	68
3.9	Descrizione del layout completo	69
3.10	Confronto delle prestazioni	73
3.11	Schematico SDC aggiornato	75
4	Possibili sviluppi futuri	78
5	Conclusione	81
	Bibliografia	83

Elenco delle figure

1.1	Percorso della prova Skidpad	6
1.2	Vettura Hybrid M24-LH	8
1.3	Vettura Hybrid M23-H	9
1.4	Schema vettura ibrida	10
1.5	Ducati 959 originale	11
1.6	Ducati 959 ibrido	11
1.7	Componenti della batteria	13
1.8	Batteria della vettura Hybrid	14
1.9	Monoscocca e telaio	15
1.10	SDC con componenti per l'idrogeno	20
2.1	BMW Serie 7 Hydrogen	24
2.2	Proprietà dell'idrogeno a confronto con gli altri combustibili [8]	26
2.3	Sistema a iniezione indiretta	29
2.4	Sistema a iniezione diretta	30
2.5	Emissioni di NO _x in funzione del rapporto aria/carburante	31
2.6	Densità dell'idrogeno al variare della temperatura [11]	33
2.7	Classificazione dei serbatoi cilindrici per stoccaggio ad alta pressione.	35
3.1	Motore Ducati 1299	38
3.2	Motore Ducati 1299 con scarico e telaio	39
3.3	Modello GT-POWER Ducati 1299	43
3.4	Portata d'aria in g/s del Ducati 1299 a benzina	44
3.5	Percentuale di aria in funzione del lambda	46
3.6	Portata d'aria in g/s del Ducati 1299 a idrogeno	46
3.7	Portata di idrogeno in g/s	47
3.8	Percentuale di utilizzo in un giro di Endurance	48
3.9	Strategia di fuel cut-off	48
3.10	Consumo durante un giro	49
3.11	Fattore di comprimibilità dell'idrogeno	50

3.12	Bombole per idrogeno Tipo III [17]	52
3.13	Sidepod strutturale	54
3.14	Monoscocca e sidepods strutturali	55
3.15	Monoscocca e radiatori	56
3.16	Carene	57
3.17	Assieme sidepods strutturali completo	58
3.18	Linea carburante	59
3.19	On Tank Devices	60
3.20	Schematico OTD	61
3.21	Connettore a sgancio rapido	62
3.22	Collettore	63
3.23	Valvola manuale	64
3.24	Tubo flessibile per idrogeno	65
3.25	Tubo rigido per idrogeno	66
3.26	Sensore di alta pressione per idrogeno	67
3.27	Sensore di bassa pressione per idrogeno	68
3.28	Disco di rottura	69
3.29	Vettura a idrogeno in vista isometrica	70
3.30	Vettura a idrogeno vista dall'alto	71
3.31	Vettura a idrogeno in vista laterale	72
3.32	Tabelle dei componenti rimossi e aggiunti	73
3.33	Andamento della potenza termica	74
3.34	Shutdown circuit dei componenti idrogeno	77

Elenco delle tabelle

1.1	Punteggi eventi statici e dinamici [1]	4
1.2	Caratteristiche Ducati 959 con una sola testa	12
3.1	Caratteristiche Ducati 1299	37

Nomenclature

<i>AFR</i>	Rapporto aria combustibile
<i>DI</i>	Direct Injection
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation
<i>FSA</i>	Formula Student Austria
<i>FSEast</i>	Formula Student East
<i>FSF</i>	Formula Student France
<i>FSUK</i>	Formula Student UK
<i>HSMS</i>	Hydrogen System Master Switch
<i>HSO</i>	Hydrogen Safety Officer
<i>LHV</i>	Potere calorifero inferiore
<i>MMR</i>	MORE Modena Racing
<i>N/C</i>	Normalmente chiuso
<i>OTD</i>	On Tank Device
<i>PFI</i>	Port Fuel Injection
<i>PRD</i>	Pressure Relief Device
<i>RON</i>	Research Octane Number
<i>SDC</i>	Shutdown Circuit
<i>TPRD</i>	Thermal Pressure Relief Device
<i>TS</i>	Tractive System

CCH_2	Idrogeno crio-compresso
CGH_2	Idrogeno gassoso compresso
H_2-ICE	Motore a combustione interna a idrogeno
LH_2	Idrogeno liquido

Introduzione

Negli ultimi anni la mobilità sostenibile ha assunto un ruolo sempre più centrale, spinta dall'urgenza di ridurre le emissioni che contribuiscono ai cambiamenti climatici e di limitare l'impatto ambientale del settore dei trasporti. Questo scenario ha stimolato l'intero mondo automotive, e in particolare il motorsport, a cercare alternative ai tradizionali combustibili fossili.

In questo contesto di transizione energetica, l'idrogeno emerge come una delle soluzioni più promettenti. Le sue caratteristiche lo rendono un combustibile particolarmente interessante: possiede un elevato potere calorifico per unità di massa, la sua combustione non produce emissioni di carbonio e può essere prodotto da fonti rinnovabili attraverso processi di elettrolisi. Tra le diverse applicazioni nei veicoli, particolare attenzione è rivolta ai motori a combustione interna alimentati a idrogeno (H_2 -ICE). Questa tecnologia rappresenta un efficace compromesso, poiché consente di procedere verso la decarbonizzazione sfruttando architetture motoristiche consolidate e ben conosciute.

La presente tesi si concentra proprio su questo tema, analizzando la fattibilità tecnica e progettuale dell'adozione di un motore a combustione interna alimentato a idrogeno in un prototipo Formula Student. Come base per lo studio è stato preso il motore bicilindrico Ducati 1299, da cui è stato sviluppato un layout preliminare per una monoposto alimentata a idrogeno.

Un aspetto cruciale è rappresentato dalla normativa: con l'introduzione, nel 2024, dell'Hydrogen Rulebook da parte di Formula Student Austria, per la prima volta è stata autorizzata la partecipazione di vetture con motori H_2 -ICE. Il regolamento impone requisiti specifici in termini di sicurezza passiva, dispositivi di controllo, limiti di massa del carburante e protocolli di spegnimento in caso di emergenza, aspetti che sono stati attentamente analizzati e integrati nel progetto.

Il lavoro si sviluppa in diverse fasi complementari. In primo luogo, è stata condotta un'analisi energetica attraverso modelli termodinamici e simulazioni monodimensionali con il software GT-POWER, che ha permesso di stimare

il fabbisogno d'aria, il rapporto stechiometrico ottimale, i consumi nel ciclo Endurance e il potenziale rendimento volumetrico. Successivamente, è stato progettato il layout della vettura, con particolare attenzione all'integrazione dei serbatoi ad alta pressione (350 bar), al percorso della linea carburante, alla selezione dei componenti per lo stoccaggio (valvole, regolatori e sensori) e alla configurazione dei sidepods, garantendo sicurezza, facilità di accesso e un corretto bilanciamento delle masse.

Infine, la tesi esplora possibili sviluppi futuri, quali l'adozione di sistemi di iniezione diretta ad alta pressione, strategie di combustione lean-burn modulata, ottimizzazione della distribuzione delle masse per preservare la dinamica della vettura e la creazione di modelli numerici avanzati per simulare l'intero ciclo di funzionamento del motore a idrogeno.

L'approccio adottato è multidisciplinare e si basa su una combinazione di calcoli, simulazioni software, analisi di componenti certificati e confronto continuo con la normativa vigente. I risultati ottenuti dimostrano che la conversione del prototipo a motore a idrogeno è tecnicamente fattibile, garantendo standard di sicurezza elevati. Tuttavia, si registra una riduzione delle prestazioni principalmente dovuta all'impiego di strategie di combustione magra necessarie per ottimizzare l'efficienza. Le soluzioni progettuali sviluppate rispettano i requisiti regolamentari, garantiscono un'autonomia adeguata per l'intera gara e mantengono le caratteristiche dinamiche della vettura entro parametri competitivi.

In conclusione, questo lavoro si inserisce in un più ampio percorso di innovazione e sperimentazione tecnologica promosso dal team MMR, contribuendo concretamente alla transizione verso un motorsport più sostenibile e aprendo nuove prospettive per l'impiego dell'idrogeno nelle competizioni studentesche e nel settore automotive ad alte prestazioni.

Capitolo 1

Formula Student: dalla competizione al progetto MMR Hydrogen

1.1 Introduzione alla Formula SAE

Formula SAE, meglio conosciuta in Europa come Formula Student, è una competizione internazionale rivolta a studenti universitari con l'obiettivo di progettare, costruire e gareggiare con un prototipo di vettura monoposto di tipo formula. Nata negli Stati Uniti nel 1981 e diffusasi rapidamente in tutto il mondo, la Formula SAE rappresenta un'opportunità preziosa per i futuri ingegneri, offrendo loro un'esperienza pratica nella progettazione automobilistica, nella gestione di progetto e nel lavoro di squadra.

Organizzata dalla SAE International, la competizione coinvolge tutti i dipartimenti di ingegneria (e non solo) delle università partecipanti, permettendo così agli studenti di mettere in pratica le conoscenze acquisite durante il loro percorso di studi e di sviluppare competenze non solo tecniche, ma anche gestionali e comunicative. La sfida va oltre la semplice progettazione e costruzione del veicolo, includendo aspetti legati alla gestione dei costi, alla strategia di mercato e alla presentazione del progetto.

Negli ultimi anni, la competitività nel settore automotive ha subito una profonda trasformazione, segnata dall'introduzione di categorie speciali per veicoli elettrici e autonomi, in linea con la transizione verso una mobilità sostenibile. In particolare, competizioni come FSA (Formula Student Austria), FSEast (Formula Student East) e FSF (Formula Student France) stanno promuovendo l'impiego di motorizzazioni a idrogeno, incentivando i

team a sviluppare soluzioni innovative e ad avanzare nella ricerca su questa tecnologia emergente.

1.2 Le prove in gara nella Formula SAE

Un evento di competizione Formula SAE si suddivide in due grandi categorie: prove statiche e prove dinamiche, entrambe pensate per mettere alla prova le capacità ingegneristiche, progettuali e organizzative dei team partecipanti.

Le prove statiche si concentrano sugli aspetti teorici e gestionali del progetto, richiedendo ai gruppi di lavoro di dimostrare non solo la validità tecnica delle soluzioni adottate, ma anche la sostenibilità economica e la visione strategica che hanno guidato lo sviluppo del veicolo.

Le prove dinamiche, invece, valutano direttamente in pista le prestazioni e la resistenza della vettura in condizioni che simulano un vero contesto competitivo.

Questo approccio integrato consente di analizzare il progetto nella sua totalità, offrendo agli studenti un'esperienza formativa unica e multidisciplinare.

Prova	Tipologia	Punteggio Max
Design event	Statica	150
Cost and Manufacturing	Statica	100
Business Presentation	Statica	75
Acceleration	Dinamica	75
Skidpad	Dinamica	75
Autocross	Dinamica	100
Endurance	Dinamica	325
Efficiency	Dinamica	100
TOTALE	—	1000

Tabella 1.1: Punteggi eventi statici e dinamici [1]

1.2.1 Prove Statiche

Le prove statiche rappresentano un elemento fondamentale della Formula SAE, poiché valutano non solo le competenze tecniche dei team, ma anche la loro capacità di gestire il progetto in un'ottica complessiva, prendendo

in considerazione aspetti ingegneristici, economici e commerciali. Nel complesso, queste prove possono assegnare fino a 325 punti.

Nel Design Event (fino a un massimo di 150 punti), una giuria composta da esperti del settore automobilistico analizza nel dettaglio le scelte progettuali compiute dal team. Vengono esaminati tutti i principali sottosistemi del veicolo, tra cui aerodinamica, telaio, sospensioni, trasmissione e sicurezza, e il team è chiamato a giustificare ogni decisione tecnica attraverso calcoli, simulazioni e prototipi. L'obiettivo della prova è quello di valutare in che misura gli studenti comprendano a fondo il funzionamento delle soluzioni adottate e quanto queste siano coerenti con l'obiettivo di sviluppare un veicolo performante, affidabile e sicuro.

Nel Cost e Manufacturing Event (fino a 100 punti), l'attenzione si concentra sulla capacità del team di stimare e gestire i costi relativi alla produzione del veicolo. È richiesto un report dettagliato che riporti il costo stimato di ogni componente, nonché dei relativi processi produttivi. Inoltre, nel cosiddetto Real Case Scenario, i giudici propongono una simulazione di modifica progettuale e/o produttiva: il team deve essere in grado di affrontare il cambiamento in modo efficace, dimostrando la propria capacità di adattare il progetto a nuove condizioni senza sforare il budget prefissato né compromettere le prestazioni del veicolo.

Nel Business Presentation Event (fino a 75 punti) viene valutata l'efficacia con cui il team riesce a presentare il proprio veicolo come un prodotto commerciale. Attraverso la simulazione di una presentazione rivolta a potenziali investitori, gli studenti devono illustrare la strategia di mercato, le prospettive di redditività e la possibilità di produrre in scala industriale il prototipo sviluppato. In questo modo vengono messe alla prova le competenze comunicative del team, oltre alla coerenza e realizzabilità della visione imprenditoriale alla base del progetto.

1.2.2 Prove Dinamiche

Le prove dinamiche costituiscono la parte della competizione in cui vengono valutate le reali prestazioni del veicolo in pista. Si tratta di test condotti in condizioni controllate, ma rappresentativi di uno scenario competitivo, in cui l'affidabilità del progetto, le performance ingegneristiche e le capacità di guida del team si intrecciano in modo determinante. Complessivamente, le prove dinamiche attribuiscono fino a 675 punti, contribuendo in maniera decisiva al punteggio totale della gara.

La Acceleration (fino a 75 punti) è una prova lineare che misura il tempo necessario al veicolo per percorrere 75 metri in rettilineo. Questo test

mette in evidenza la capacità di accelerazione del mezzo e riflette in modo diretto l'efficacia del gruppo motopropulsore, la rapidità della trasmissione e l'aderenza offerta dal sistema gomme-sospensioni. Il tempo migliore registrato tra i tentativi disponibili determina il punteggio assegnato.

Lo Skidpad (fino a 75 punti) si concentra invece sul comportamento dinamico laterale del veicolo. Il test si svolge su un circuito a forma di otto, e valuta la tenuta in curva e la distribuzione dei carichi durante cambi di direzione simmetrici. È una prova che premia un buon bilanciamento del telaio, la qualità delle sospensioni e l'efficienza del sistema di pneumatici.

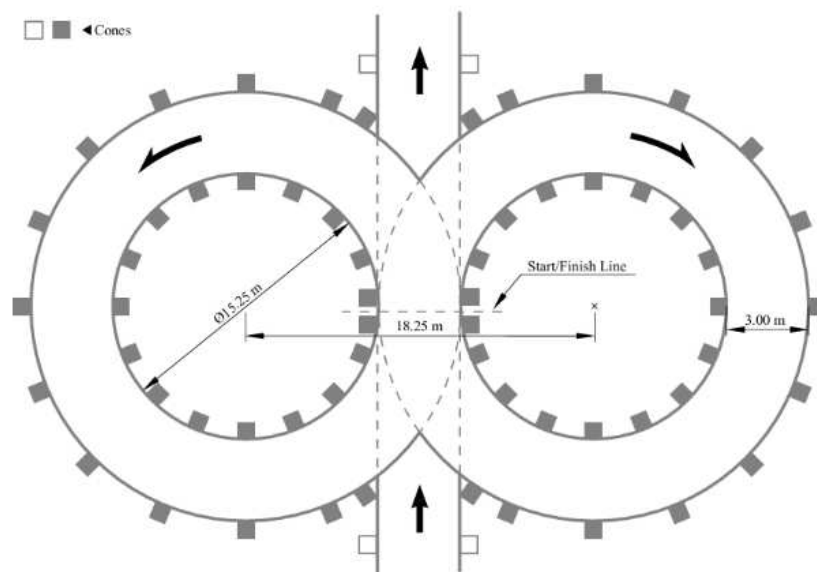


Figura 1.1: Percorso della prova Skidpad

L'Autocross (fino a 100 punti) rappresenta un banco di prova completo per l'agilità e la maneggevolezza della vettura. Il tracciato, ricco di curve strette, slalom e bruschi cambi di direzione, simula un giro di qualifica in gara. L'obiettivo è ottenere il tempo sul giro più basso possibile, evidenziando le qualità dinamiche del veicolo e la reattività alle manovre del pilota.

La prova di Endurance (fino a 325 punti) è il test più impegnativo e rappresenta la vera sintesi del lavoro progettuale svolto dal team. Su un tracciato di circa 22 km, il veicolo deve completare l'intero percorso senza subire guasti o cali prestazionali. È una prova che mette alla prova non solo la resistenza meccanica e la qualità costruttiva, ma anche la capacità di gestione termica ed energetica del sistema.

Durante l'Endurance viene anche valutata l'Efficiency (fino a 100 punti), che misura l'efficienza energetica del veicolo nel completare la prova. I team

che riescono a percorrere la distanza con il minor consumo possibile ottengono i punteggi più alti. Questo criterio incentiva lo sviluppo di tecnologie orientate alla sostenibilità e rappresenta una delle sfide più moderne e significative nell'ambito della mobilità.

1.3 La storia di MMR

Il Team MMR (MORE Modena Racing) [2] dell'Università di Modena e Reggio Emilia nasce nel 2003 ed è noto per la sua partecipazione alle competizioni Formula SAE fin dal 2004, fondato con l'obiettivo di offrire agli studenti un'esperienza pratica nel campo dell'ingegneria automobilistica. Nel corso degli anni, il team ha ottenuto risultati significativi, consolidando la propria reputazione a livello internazionale. La vettura a combustione nel 2019 ha raggiunto un traguardo storico vincendo la competizione Formula Student UK a Silverstone. Questo successo ha visto il team primeggiare su oltre 100 squadre provenienti da più di 20 paesi, evidenziando l'eccellenza ingegneristica dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Nel 2023 ha replicato l'impresa, conquistando nuovamente il primo posto alla Formula Student UK. Questo risultato ha sottolineato la costanza e la qualità del lavoro svolto dal team nel corso degli anni. Il 2024 è stato un anno particolarmente fruttuoso per il team MMR. A luglio, il team ha trionfato nella Formula Student Austria al Red Bull Ring di Zeltweg, diventando il primo team italiano a vincere questa prestigiosa competizione. La vettura a biocombustibile ha dimostrato elevate prestazioni e affidabilità. Successivamente, in agosto, ha ottenuto un'altra vittoria alla Formula Student Alpe Adria in Croazia, consolidando la propria posizione di leader nel panorama delle competizioni studentesche. A Settembre infine ha portato a casa la terza vittoria stagionale nella competizione Formula Student Italia.



Figura 1.2: Vettura Hybrid M24-LH

Dal 2017 oltre alla vettura a combustione è nato il progetto della vettura ibrida con l'intento di esplorare soluzioni innovative nel campo dell'elettrificazione per migliorare le prestazioni e ridurre le emissioni. Nel 2018, il team MMR è stato il primo a presentare una vettura da corsa ibrida alla Formula Student, debuttando nella Concept Class a Silverstone. L'architettura risultante è quella di un veicolo ibrido, con un sistema ad alta tensione (High Voltage) una configurazione estremamente avanzata per il contesto della Formula Student. Questa soluzione ha però comportato una serie di sfide regolamentari. All'epoca, infatti, non esisteva una categoria ufficiale ibrida all'interno delle competizioni di Formula Student. La vettura del MMR ha quindi potuto gareggiare esclusivamente nell'evento di Formula Student UK (FSUK), grazie a un regolamento speciale concordato con gli organizzatori della competizione.



Figura 1.3: Vettura Hybrid M23-H

1.4 Aspetti tecnici della vettura Hybrid

La vettura M23-H è una vettura ibrida, sviluppata per la partecipazione alla Formula Student, che coniuga soluzioni avanzate in ambito automobilistico e tecnologie elettriche ad alte prestazioni. Il cuore del sistema propulsivo è una power unit ibrida composta da un motore termico Ducati 959, un bicilindrico a V da 955 cm³, accoppiato a un motore elettrico da 30 kW. Questa combinazione ha permesso di ottenere un equilibrio interessante tra potenza e coppia, sfruttando la spinta immediata dell'elettrico e la progressione del motore termico. Il sistema elettrico è alimentato da un pacco batteria custom, sviluppato internamente, con una tensione nominale di 97.2 V. Il pacco è realizzato con celle cilindriche di tipo 18650, una scelta motivata dal buon compromesso tra densità energetica, capacità di raffreddamento e disponibilità sul mercato. L'architettura del battery pack è stata progettata per garantire massima sicurezza in caso di urti e per ottimizzare il bilanciamento dei pesi all'interno del veicolo. [3]

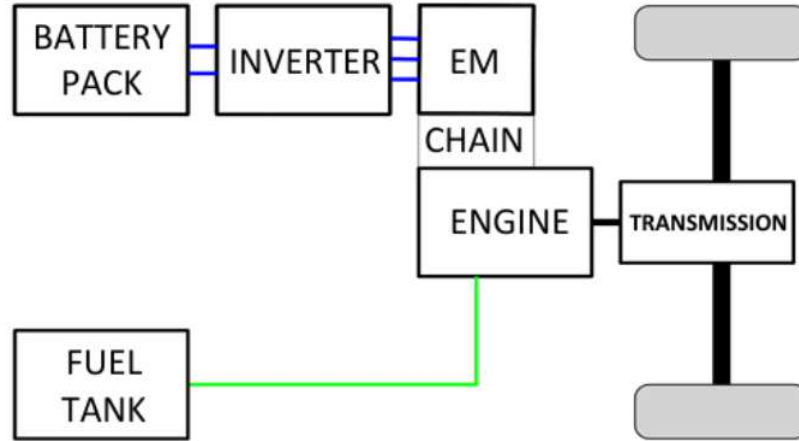


Figura 1.4: Schema vettura ibrida

La configurazione della power unit della vettura ibrida adottata nel progetto si basa su un'architettura P0, nella quale il motore elettrico viene posizionato direttamente in linea con il motore a combustione interna. Il propulsore scelto è un Ducati 959, un bicilindrico a V con distribuzione desmodromica, opportunamente modificato per integrarsi con il sistema ibrido. Per realizzare questa configurazione, è stata rimossa una delle due teste del motore, sostituendola con un motore elettrico sincrono da 30 kW, appositamente progettato per essere alloggiato nella stessa posizione. Questo ha permesso di realizzare un case su misura per il motore elettrico, completo di camicia di raffreddamento, che ricalca e riprende i condotti originali della testa motore rimossa, semplificando così l'integrazione con l'impianto di raffreddamento esistente. Il motore elettrico è collegato direttamente all'albero motore del Ducati tramite una trasmissione a catena, con un accoppiamento compatto ed efficace che consente un trasferimento diretto della coppia. Questo tipo di configurazione è stato scelto per minimizzare le perdite meccaniche e mantenere la reattività del sistema, oltre a semplificare il layout complessivo del powertrain.



Figura 1.5: Ducati 959 originale

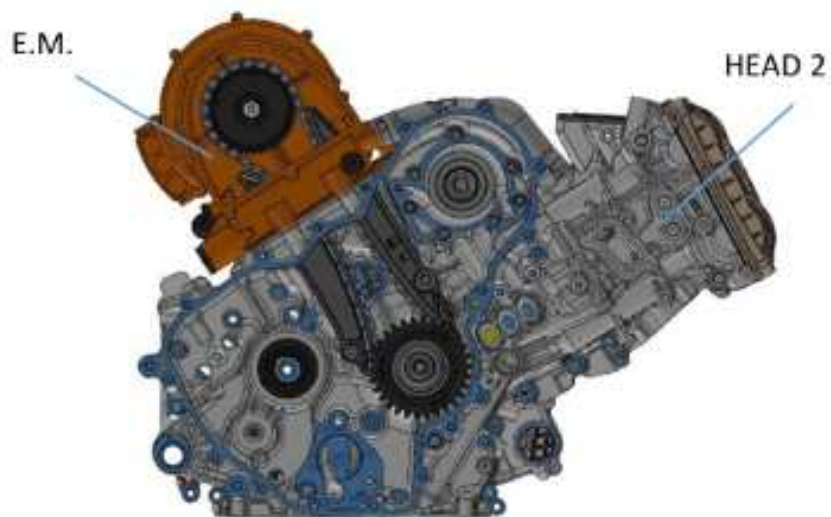


Figura 1.6: Ducati 959 ibrido

Cilindrata	477.5 cc
Alesaggio e Corsa	100 x 60.8 mm
Potenza Max	46 kW @ 10500 rpm
Coppia Max	44 Nm @ 8500 rpm

Tabella 1.2: Caratteristiche Ducati 959 con una sola testa

Un ulteriore dettaglio tecnico di rilievo riguarda la gestione del cilindro non attivo del motore termico. Infatti, per mantenere l'equilibratura meccanica dell'albero motore, progettato originariamente per due pistoni, il pistone del cilindro disattivato è stato mantenuto. La sua rimozione avrebbe compromesso la regolarità di funzionamento, generando vibrazioni e squilibri meccanici non trascurabili. Tuttavia, per ridurre le perdite per pompaggio causate dal movimento del pistone all'interno di un cilindro non più attivo, il componente è stato modificato tramite foratura, così da consentire il libero passaggio dell'aria e abbattere la resistenza aerodinamica interna. In questo modo si è ottenuto un buon compromesso tra equilibratura dinamica e ottimizzazione del rendimento meccanico della power unit. Queste soluzioni progettuali dimostrano la volontà di massimizzare l'efficienza e l'integrazione meccanica tra i due motori, sfruttando al massimo le caratteristiche dell'architettura originaria Ducati e adattandola alle specifiche esigenze del sistema ibrido adottato per la competizione.

La batteria del sistema ibrido è stata progettata con un'attenzione particolare all'architettura modulare, alla sicurezza e alla facilità di manutenzione. È composta da tre segmenti distinti, ciascuno dei quali contribuisce a formare una configurazione complessiva di 27 celle in serie e 10 in parallelo, per un totale di 270 celle cilindriche di tipo 18650. Le celle selezionate sono le Sony VTC6, note per le loro elevate prestazioni, con una capacità nominale di 3000 mAh e un'ottima densità energetica, particolarmente adatte ad applicazioni motorsport grazie anche alla loro affidabilità in condizioni di scarica elevata. La configurazione complessiva fornisce una tensione nominale di 97.2 V, valore scelto come compromesso tra densità energetica, sicurezza e compatibilità con il sistema di trazione elettrica. Ogni segmento della batteria è stato progettato per essere elettricamente e meccanicamente indipendente, agevolando così interventi di sostituzione, monitoraggio e bilanciamento termico. Una delle caratteristiche più innovative del pacco batteria riguarda la connessione elettrica tra le celle e le busbar. Invece di ricorrere alla classica saldatura a punti, che può introdurre stress termici dannosi per le celle e complicare le operazioni di sostituzione o ispezione, si è optato per un sistema di contatto

meccanico tramite molle a tazza. Queste molle, appositamente dimensionate, garantiscono un contatto elettrico affidabile tra ciascuna cella e i relativi busbar, assicurando una pressione costante e una connessione stabile nel tempo, anche in presenza di vibrazioni o dilatazioni termiche. Questa soluzione presenta numerosi vantaggi: evita il surriscaldamento localizzato delle celle durante l'assemblaggio, consente una manutenzione modulare e sicura, e semplifica eventuali sostituzioni di celle guaste senza necessità di interventi invasivi. Inoltre, il sistema a molle contribuisce a compensare eventuali tolleranze dimensionali tra le celle, migliorando la distribuzione del carico e prolungando la vita utile del pacco batteria.

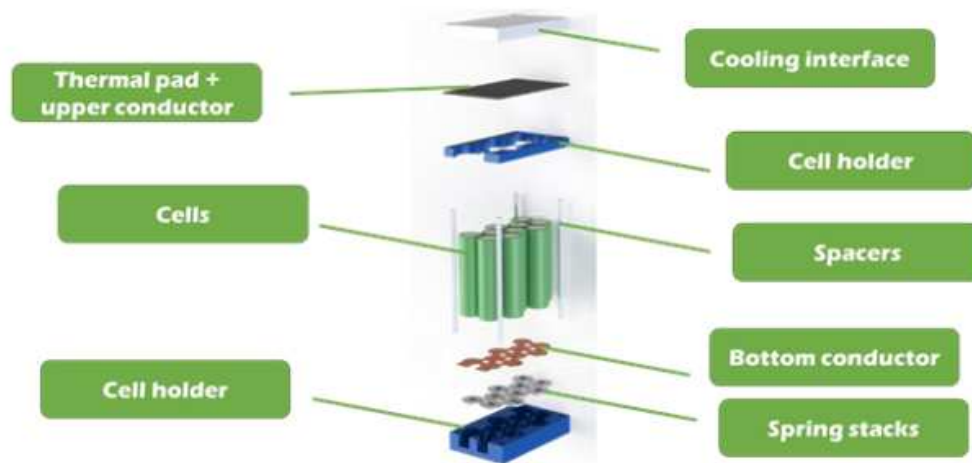


Figura 1.7: Componenti della batteria



Figura 1.8: Batteria della vettura Hybrid

Tutti gli elementi chiave della power unit, sia termici che elettrici, sono contenuti in una monoscocca in fibra di carbonio accoppiata a un telaio posteriore in acciaio. Questa scelta è stata dettata da diversi fattori progettuali fondamentali, tutti mirati a ottimizzare l'efficienza, l'integrazione e la sicurezza del sistema veicolo.

La monoscocca costituisce il telaio fondamentale dell'automobile, garantendo un'elevata rigidità torsionale con un peso minimo. Inoltre, offre una base solida per il fissaggio sicuro dei vari componenti della power unit, sia a combustione interna che elettrici. Il pacco batteria, parte dell'elettronica di potenza e l'interfaccia con il sistema di raffreddamento sono alloggiati all'interno di questa struttura. L'utilizzo di una struttura in carbonio garantisce anche un'eccellente protezione per il Tractive System (TS), come previsto dal regolamento Formula Student, assicurando isolamento meccanico e resistenza adeguata in caso di urti.

Dal punto di vista dell'accessibilità, la suddivisione della carrozzeria in due parti distinte, monoscocca e telaio, permette interventi rapidi e selettivi durante le attività di manutenzione o di test. Il telaio in acciaio, situato posteriormente e imbullonato alla sezione in composito, ha una doppia funzione: da un lato sostiene il motore termico, dall'altro accoglie tutti gli elementi ausiliari, come lo scarico, i cablaggi secondari, ecc.

Questa configurazione modulare ha inoltre facilitato l'integrazione dei componenti ibridi, migliorando la gestione termica. Inoltre, l'inclusione del

telaio in acciaio si è rivelata fondamentale per semplificare l'integrazione dei diversi componenti, consentendo una disposizione più efficiente e ordinata, nonché l'utilizzo di supporti personalizzati per ciascun elemento, evitando compromessi in termini di dimensionamento o vincoli strutturali.

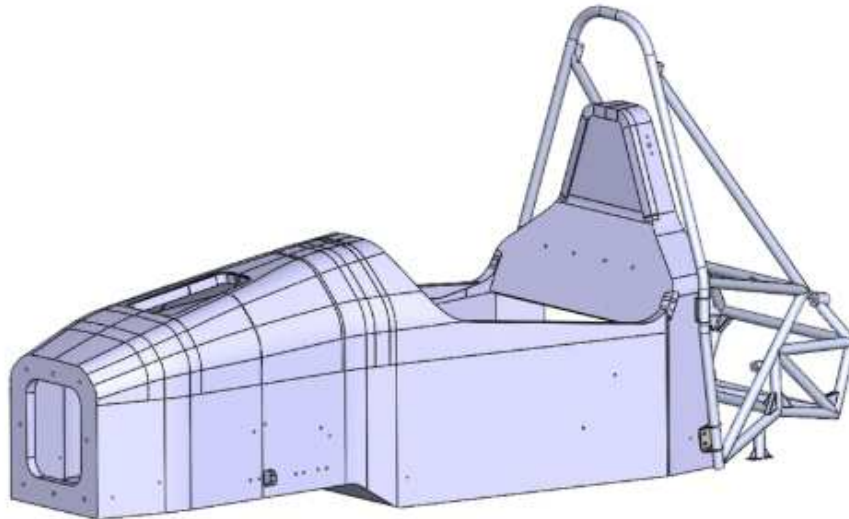


Figura 1.9: Monoscocca e telaio

1.5 Il nuovo regolamento per la vettura a idrogeno

Negli ultimi anni, la Formula Student si è dimostrata sempre più attenta alle tematiche della sostenibilità e dell'innovazione tecnologica. In linea con le tendenze emergenti nel settore automotive e nella mobilità a basse emissioni, è stato recentemente introdotto un nuovo regolamento specifico per i veicoli a idrogeno, che amplia le possibilità progettuali per i team universitari di tutto il mondo. Questo Hydrogen Rulebook, pubblicato per la prima volta in forma ufficiale nel 2024 da Formula Student Austria (FSA), non sostituisce, ma si aggiunge al regolamento tecnico e di sicurezza già esistente per le categorie Combustion, Electric e Driverless. Si tratta di un insieme di linee guida supplementari, pensate per regolare in modo preciso e

sicuro l'impiego dell'idrogeno sia in forma di cella a combustibile (Fuel Cell) sia come combustibile per motori a combustione interna (H_2 -ICE). [4]

1.5.1 Idrogeno e linea carburante

La prima sezione del regolamento "Hydrogen Rules" per la Formula Student si concentra sui requisiti relativi al sistema di alimentazione a idrogeno, stabilendo i criteri tecnici e di sicurezza fondamentali per tutti i veicoli che intendono utilizzare questo tipo di combustibile. In particolare, il regolamento specifica che l'idrogeno può essere impiegato esclusivamente in forma gassosa e deve essere stoccato a una pressione massima di 350 bar. Tale limite è stato stabilito per garantire un compromesso adeguato tra autonomia, sicurezza e complessità di gestione dei componenti sotto pressione. Questa configurazione si applica indistintamente sia ai veicoli dotati di sistema a celle a combustibile (Fuel Cell), sia a quelli che impiegano un motore a combustione interna alimentato a idrogeno (H_2 -ICE), entrambe le architetture ammesse ufficialmente dal nuovo regolamento. Un aspetto cruciale introdotto da questa normativa riguarda la classificazione dei componenti del sistema carburante: tutte le parti che costituiscono la linea di alimentazione dell'idrogeno, inclusi serbatoi (bombole), tubazioni, valvole, regolatori e raccordi, sono considerate componenti critici di sicurezza. Di conseguenza, esse devono essere posizionate all'interno della Primary Structure del veicolo, ovvero in zone strutturalmente protette e in grado di offrire un'adeguata resistenza in caso di impatto. È consentita l'installazione delle bombole di idrogeno nei side pods laterali del veicolo, a patto che questi elementi siano progettati come strutture portanti e siano in grado di garantire protezione meccanica, integrità strutturale e contenimento delle forze d'urto in accordo con le normative di sicurezza del regolamento generale Formula Student. Inoltre, per minimizzare il rischio di incendi o malfunzionamenti dovuti al surriscaldamento, viene imposto un limite termico importante: tutte le sezioni della linea di alimentazione a idrogeno devono essere adeguatamente protette da qualsiasi fonte di calore superiore agli $85^{\circ}C$. Questo implica la necessità di un'attenta progettazione del layout interno della vettura, con l'inserimento di barriere termiche, schermature, materiali isolanti o, se necessario, il riposizionamento di elementi caldi (come tubazioni di scarico, radiatori o collettori) per mantenere il sistema a idrogeno in condizioni operative sicure.

1.5.2 Serbatoi di idrogeno e ausiliari

La seconda sezione del regolamento dedicato ai veicoli a idrogeno nella Formula Student riguarda in modo specifico i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno (Hydrogen Tanks) e i relativi componenti di sicurezza associati. Questa parte normativa è fondamentale per garantire un utilizzo sicuro di un gas ad alta pressione come l'idrogeno, minimizzando i rischi legati a perdite, sovrappressioni o malfunzionamenti meccanici. Tutti i serbatoi impiegati nei veicoli devono essere certificati per lo stoccaggio di idrogeno gassoso a una pressione nominale di 350 bar, che rappresenta il limite massimo consentito per l'applicazione Formula Student. Tali bombole devono essere realizzate secondo standard internazionali e non devono presentare difetti visibili quali ammaccature, crepe, corrosione o danneggiamenti superficiali che potrebbero compromettere l'integrità del contenitore sotto pressione. A ogni serbatoio deve essere accoppiato un sistema denominato OTD (On-Tank Devices). Questo dispositivo integra diversi componenti di sicurezza essenziali come una valvola principale di intercettazione, per il controllo manuale o elettronico del flusso e una valvola di sovrappressione termica (TPRD, Thermal Pressure Relief Device), progettata per attivarsi in caso di eccessivo innalzamento della temperatura, evitando l'accumulo pericoloso di pressione interna. Per quanto riguarda la gestione del flusso e della pressione dell'idrogeno in uscita, il regolamento stabilisce che la pressione massima a valle del regolatore primario non deve superare i 40 bar. Questo valore è stato scelto per mantenere un adeguato margine di sicurezza tra la pressione di stoccaggio e quella di utilizzo nelle linee a valle, che alimentano la fuel cell o il motore a combustione. Un altro requisito fondamentale riguarda la segmentazione delle sezioni del circuito in base alla pressione. Ogni tratto in cui la pressione cambia deve essere protetto da un meccanismo fisico anti-sovrappressione, come valvole meccaniche o dischi di rottura (burst plates). Questi componenti devono essere tarati per intervenire in modo affidabile in caso di guasto al regolatore o di variazione anomala della pressione interna. Infine, viene posta particolare attenzione anche alla logistica e sicurezza a veicolo fermo. Le bombole di idrogeno, infatti, non possono essere portate nei box o nelle aree tecniche assieme al veicolo, ma devono essere rimosse e conservate in aree designate, sicure e controllate all'interno del circuito. Per rendere possibile questa operazione in modo efficiente e ripetibile, il regolamento impone la presenza di un connettore di disaccoppiamento rapido tra la linea del veicolo e la bombola. Questo connettore deve consentire connessioni e disconnessioni multiple senza degradazione della tenuta e deve essere progettato per evitare rilascio accidentale di gas.

1.5.3 Limiti dei veicoli a combustione

La terza sezione del regolamento “Hydrogen Rules” si rivolge in modo specifico ai veicoli alimentati da motori a combustione interna che utilizzano idrogeno come combustibile principale, fornendo indicazioni dettagliate sulle configurazioni consentite e sui limiti imposti alla progettazione del sistema propulsivo. In primo luogo, viene stabilito che il motore utilizzato deve essere a quattro tempi, in linea con il regolamento generale delle vetture Combustion Vehicle (CV). La cilindrata massima ammessa è di 1600 cc, questo limite ha lo scopo di mantenere parità di condizioni tra i team e di limitare le potenze in gioco, nel rispetto degli obiettivi di sicurezza e contenimento dei costi. Per quanto riguarda il sistema di alimentazione, il regolamento consente l'utilizzo di due diverse tipologie di iniezione dell'idrogeno sia PFI (Port Fuel Injection) cioè iniezione indiretta nel collettore di aspirazione sia DI (Direct Injection) cioè iniezione diretta in camera di combustione. In entrambi i casi, la pressione massima di iniezione dell'idrogeno è fissata a 40 bar, al fine di garantire sicurezza e compatibilità con i componenti standard impiegati nei sistemi a idrogeno automotive. Non vengono invece imposti limiti alla portata d'aria o di idrogeno che può essere introdotta nel motore, lasciando ai team ampio margine per lo sviluppo di strategie di combustione innovative, sia in ottica di efficienza sia di performance. Un altro punto rilevante è che il regolamento permette l'impiego di turbocompressori, offrendo ai team la possibilità di sfruttare la sovralimentazione per migliorare la densità energetica e la risposta del propulsore alimentato a idrogeno, che per sua natura ha una densità energetica volumetrica inferiore rispetto ai carburanti fossili liquidi. È inoltre consentita l'adozione di un powertrain ibrido, secondo le stesse condizioni e limitazioni stabilite dal regolamento CV + Hybrid. I team che scelgono questa configurazione potranno integrare un sistema elettrico a supporto della trazione, con batterie, inverter e motore elettrico, a patto che vengano rispettati i vincoli imposti alle architetture ibride (es. potenza massima, tensione del sistema, peso batterie, ecc.). Infine, pur non essendoci limiti sulla portata istantanea di combustibile, viene imposto un vincolo fondamentale per la sicurezza e la gestione del rischio: la quantità massima di idrogeno stoccabile a bordo del veicolo non deve superare i 2 kg. Questo limite si riferisce alla massa complessiva contenuta nei serbatoi (fuel tanks) e rappresenta un criterio chiave nella progettazione del sistema di alimentazione, influenzando l'autonomia, il layout della vettura e la gestione termica e volumetrica del comparto idrogeno.

1.5.4 Gestione della sicurezza per l'idrogeno

La sicurezza rappresenta uno degli aspetti più delicati e prioritari nella progettazione di un veicolo Formula Student alimentato a idrogeno. Per questo motivo, il nuovo regolamento introduce una serie di requisiti tecnici e organizzativi specifici, mirati a prevenire situazioni di rischio legate a perdite, sovrappressioni, fughe di gas o malfunzionamenti del sistema di alimentazione. Uno dei primi punti fondamentali riguarda la definizione di una nuova figura ufficiale all'interno del team: l'HSO (Hydrogen Safety Officer). Questo responsabile ha il compito di sovrintendere a tutte le operazioni che coinvolgono l'idrogeno, dalla gestione logistica dei serbatoi, al rifornimento, fino alla supervisione durante le fasi di test e gara. L'HSO deve avere una conoscenza approfondita del sistema a idrogeno installato sulla vettura e deve collaborare direttamente con i giudici tecnici dell'evento per garantire il pieno rispetto delle normative di sicurezza. Dal punto di vista tecnico, il regolamento impone l'integrazione di un nuovo componente fondamentale all'interno del sistema elettrico di sicurezza del veicolo: l'HSMS (Hydrogen System Master Switch). Questo interruttore principale del sistema a idrogeno deve essere collegato direttamente al circuito di spegnimento d'emergenza (SDC, Shutdown Circuit) e deve essere in grado di interrompere in modo immediato e completo l'alimentazione di tutti i componenti attivi del sistema carburante, inclusi regolatori, valvole, attuatori e iniettori. Di conseguenza, anche il circuito SDC tradizionale viene aggiornato per includere una serie di input di sicurezza specifici per il sistema a idrogeno. In particolare, il regolamento richiede un interruttore per la rilevazione di sovratemperatura dei serbatoi (es. TPRD attivati o soglie critiche superate), un interruttore per la sovrappressione nei serbatoi, un interruttore per ogni altra possibile sovrappressione nella linea di alimentazione (post-regolatore o nella sezione di bassa pressione); Tutti questi input devono essere configurati per attivare automaticamente l'SDC, provocando l'arresto immediato del sistema a idrogeno in caso di condizioni anomale. Inoltre, viene imposto che gli On-Tank Devices (OTD) e gli iniettori siano controllati tramite due relè collegati direttamente al circuito SDC. Questo doppio comando garantisce la ridondanza elettrica, necessaria per interrompere il flusso di idrogeno in modo sicuro anche in caso di guasto di uno dei due relè o del controllo elettronico.

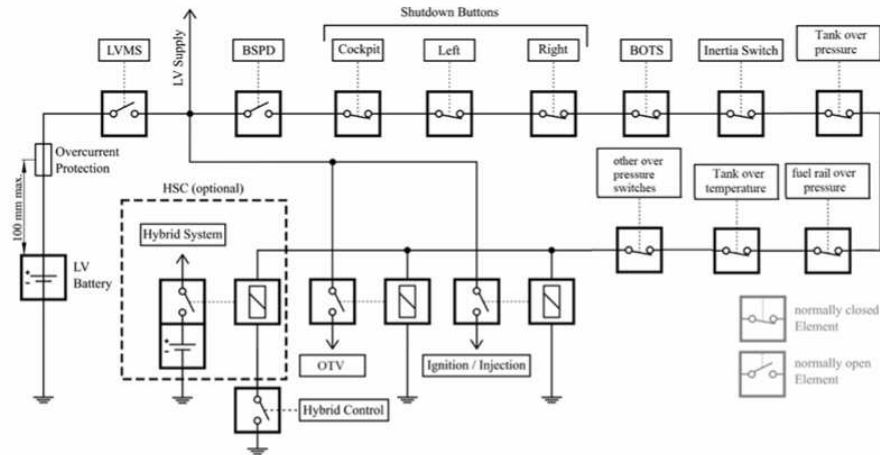


Figura 1.10: SDC con componenti per l'idrogeno

Un'ulteriore misura di sicurezza riguarda la progettazione del layout fisico della vettura, con particolare attenzione alla gestione di eventuali fughe di idrogeno. Il regolamento prevede infatti che le aree della vettura in cui sono installati componenti del sistema idrogeno (es. bombole, valvole, regolatori, raccordi, linee) devono avere aperture minime di ventilazione sufficienti ad evitare l'accumulo di idrogeno in caso di perdita. Tali aperture devono essere progettate in modo da consentire la dispersione rapida del gas verso l'esterno, riducendo il rischio di formazione di miscele esplosive. Infine, è richiesto che prima dell'introduzione dell'idrogeno nel sistema, l'intero circuito venga collaudato mediante l'utilizzo di un gas inerte (tipicamente azoto o elio). Questo test ha lo scopo di verificare eventuali perdite, difetti di assemblaggio o problemi di tenuta in condizioni sicure. Solo una volta superata questa verifica, è consentito il riempimento delle bombole con idrogeno gassoso a 350 bar, seguito da un test di tenuta finale tramite appositi rilevatori di idrogeno, così da garantire che l'intero sistema sia perfettamente sigillato e conforme alle normative di sicurezza.

Capitolo 2

L'idrogeno

2.1 Introduzione all'idrogeno

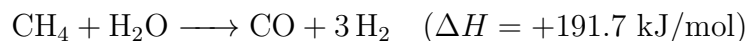
L'idrogeno è l'elemento chimico più leggero e abbondante dell'universo, rappresentato dal simbolo H e dotato di numero atomico 1. Nella sua forma molecolare più stabile, H_2 , si presenta come un gas incolore, inodore, insapore e altamente infiammabile. Nonostante sulla Terra non si trovi mai allo stato libero, l'idrogeno è presente in grandi quantità combinato con altri elementi, come ad esempio nell'acqua (H_2O), nei composti organici e nei combustibili fossili. Dal punto di vista energetico, l'idrogeno è estremamente interessante: possiede un potere calorifico superiore pari a circa 120 MJ/kg, che lo rende quasi tre volte più energetico della benzina in termini di energia per unità di massa. Tuttavia, essendo un gas molto leggero e con una bassa densità energetica per unità di volume, necessita di essere compresso (tipicamente a 350 o 700 bar) o liquefatto per essere immagazzinato in modo efficiente nei trasporti. La caratteristica più interessante dell'idrogeno dal punto di vista ambientale è che, quando viene utilizzato come vettore energetico in un motore o in una fuel cell, non produce emissioni di CO_2 , ma solamente vapore acqueo (nel caso di una cella a combustibile) o minime quantità di NO_x (nel caso di motori a combustione interna, se non adeguatamente gestiti). Questo lo rende una risorsa cruciale nella transizione verso un sistema energetico sostenibile e decarbonizzato, specialmente nei settori più difficili da elettrificare, come l'industria pesante, l'aviazione e i trasporti su lunga distanza [5].

2.2 Cenno sulla produzione dell'idrogeno

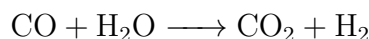
L'idrogeno, pur essendo l'elemento più abbondante dell'universo, non si trova libero sulla Terra ma legato ad altri elementi, come nell'acqua o negli idrocarburi. La sua produzione su scala industriale avviene principalmente attraverso processi chimici che coinvolgono fonti fossili, sebbene siano disponibili anche tecnologie alternative, come l'elettrolisi dell'acqua e la produzione biologica da alghe in bioreattori. Queste ultime, tuttavia, non sono ancora competitive a livello industriale per via della loro bassa efficienza e alti costi operativi rispetto ai metodi tradizionali basati su fonti fossili.

2.2.1 Produzione di idrogeno da idrocarburi

Attualmente, circa il 97% dell'idrogeno prodotto a livello globale proviene da combustibili fossili, in particolare tramite il reforming del metano, un processo chimico che coinvolge la reazione di vapore acqueo ad alta temperatura (973-1473 K) con metano per produrre una miscela di idrogeno e monossido di carbonio chiamata syngas. Questa reazione è endotermica e necessita quindi di calore, solitamente fornito bruciando una parte dello stesso metano. La reazione principale è:



Sebbene l'idrogeno prodotto venga utilizzato in molte applicazioni (tra cui la sintesi dell'ammoniaca tramite il processo Haber-Bosch), questo metodo comporta emissioni significative di CO_2 , contribuendo quindi all'effetto serra. Per mitigare la formazione di coke (carbonio solido), che può danneggiare gli impianti, si impiega spesso un eccesso di vapore nella reazione. Una fase successiva al reforming è la cosiddetta "water-gas shift reaction", in cui il monossido di carbonio viene fatto reagire con ulteriore vapore per produrre ancora idrogeno e biossido di carbonio:

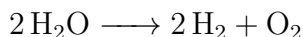


Questo passaggio, generalmente catalizzato da ossidi di ferro, permette di incrementare la resa di idrogeno, ma accentua ulteriormente le emissioni di anidride carbonica, riducendo il bilancio ambientale del processo.

2.2.2 Elettrolisi dell'acqua

L'elettrolisi dell'acqua rappresenta un'alternativa pulita ai metodi basati su combustibili fossili. In questo processo, l'acqua viene scomposta in

ossigeno e idrogeno mediante una corrente elettrica applicata tra due elettrodi immersi in acqua. L'idrogeno si raccoglie al catodo, mentre l'ossigeno si libera all'anodo:



Per definire l'idrogeno prodotto in questo modo come “idrogeno verde”, l'elettricità utilizzata deve provenire da fonti rinnovabili come il solare o l'eolico. Tuttavia, il processo è ancora penalizzato da limiti di efficienza energetica e dalla necessità di grandi quantità di acqua dolce: per produrre un solo litro di idrogeno verde servono fino a 120 litri d'acqua. In termini energetici, l'efficienza degli elettrolizzatori varia, con valori che vanno dai 50 ai 65 kWh per chilogrammo di H_2 , e una efficienza teorica che può raggiungere il 94% (42 kWh/kg) in condizioni ideali. Un elettrolizzatore perfetto consumerebbe circa 150 litri di acqua per ottenere 1 kg di idrogeno. Un'evoluzione interessante è rappresentata dall'elettrolisi ad alta temperatura, nella quale parte dell'energia necessaria è fornita sotto forma di calore invece che elettricità. Questo approccio, che può impiegare calore da impianti solari termici, nucleari o da cogenerazione, ha il potenziale per raddoppiare l'efficienza del processo fino a circa il 50%, riducendo le perdite energetiche associate alle doppie conversioni.

2.3 Storia dei motori a idrogeno

L'idea di utilizzare l'idrogeno come combustibile per i motori risale a molto tempo fa. Già nel 1807, l'inventore svizzero François Isaac de Rivaz sviluppò il primo rudimentale motore a combustione interna che utilizzava una miscela di idrogeno e ossigeno per generare potenza. Sebbene il progetto non ebbe seguito pratico all'epoca, rappresentò una pietra miliare nello sviluppo della combustione alternativa ai carburanti fossili. Nel corso del Novecento, l'interesse verso l'idrogeno rimase principalmente confinato al campo aerospaziale. Durante la corsa allo spazio, la NASA fu una delle prime istituzioni a impiegare idrogeno liquido come combustibile nei razzi vettori, sfruttando l'enorme energia generata dalla reazione con l'ossigeno liquido. Fu solo a partire dagli anni '70, con la crisi petrolifera e la crescente consapevolezza ambientale, che i ricercatori iniziarono a esplorare seriamente l'idrogeno come alternativa sostenibile ai combustibili fossili anche per il trasporto terrestre. Le prime sperimentazioni moderne di motori a idrogeno vennero condotte da case automobilistiche come BMW, Mazda, Ford e Toyota, che iniziarono a sviluppare versioni modificate dei motori a combustione interna tradizionali capaci di funzionare con idrogeno

gassoso. Un esempio emblematico fu la BMW Serie 7 Hydrogen (Hydrogen 7) presentata nei primi anni 2000, dotata di un motore V12 in grado di funzionare sia a benzina sia a idrogeno. La casa bavarese dimostrò che un motore a combustione interna può essere riconvertito per bruciare idrogeno, seppur con sfide significative in termini di efficienza, controllo delle emissioni di NO_x e capacità di stoccaggio del carburante. Parallelamente, altre aziende si orientarono verso la fuel cell (cella a combustibile), una tecnologia elettrochimica che consente di trasformare direttamente l'idrogeno in energia elettrica per alimentare un motore elettrico. Toyota, ad esempio, ha introdotto sul mercato la Mirai, una berlina fuel cell prodotta in serie, simbolo di una delle direzioni possibili per la mobilità a zero emissioni. Tuttavia, negli ultimi anni si è registrato un rinnovato interesse per i motori a combustione interna alimentati a idrogeno, soprattutto in ambiti come il motorsport e l'industria dei trasporti pesanti, dove le celle a combustibile non sono sempre la soluzione più adatta. Alcuni esempi recenti includono il motore a idrogeno sviluppato da Toyota per la Super Taikyu Series in Giappone, o le ricerche di AVL e Bosch, che vedono nell'idrogeno una possibilità concreta per estendere la vita utile dei motori a combustione in un'ottica di neutralità climatica [6] .

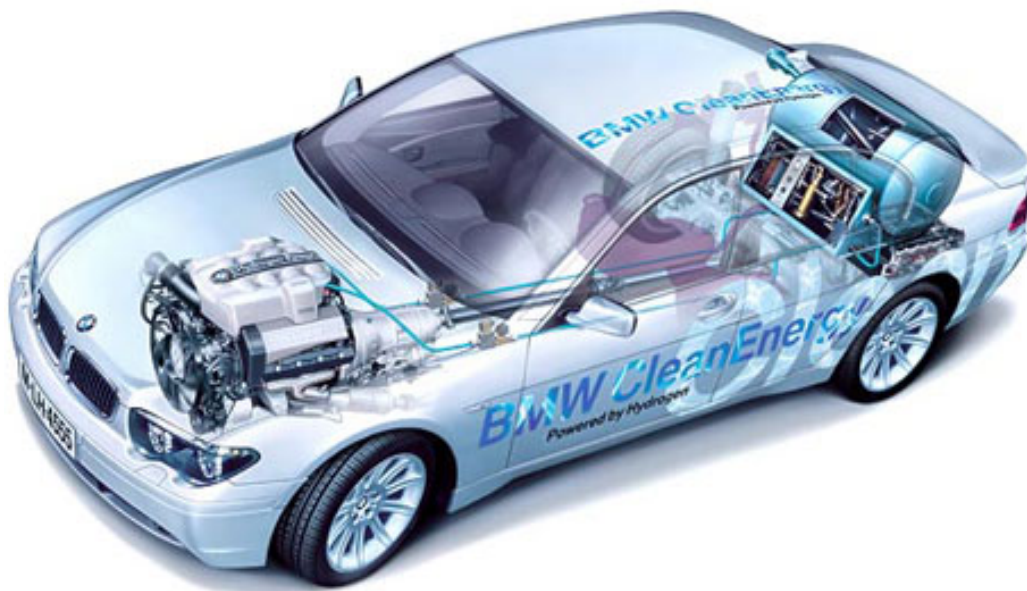


Figura 2.1: BMW Serie 7 Hydrogen

2.4 Proprietà dell'idrogeno nei motori a combustione interna

Per valutare l'idoneità dell'idrogeno come combustibile per i motori a combustione interna è fondamentale esaminare nel dettaglio alcune sue proprietà chimico-fisiche e confrontarle con quelle dei combustibili fossili tradizionali, come benzina, diesel e metano. Queste proprietà influenzano direttamente l'efficienza, le prestazioni, la sicurezza e le emissioni dei motori che lo utilizzano. Uno dei principali vantaggi dell'idrogeno è l'assenza di carbonio nella sua molecola, il che comporta la totale eliminazione delle emissioni carboniose tipiche dei carburanti fossili, come monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO₂) e particolato carbonioso. L'unico tipo di emissione inquinante potenzialmente generato dalla combustione dell'idrogeno è costituito dagli ossidi di azoto (NO_x), che si formano in presenza di elevate temperature. Dal punto di vista energetico, l'idrogeno vanta un potere calorifico inferiore (PCI) estremamente elevato, pari a circa 3 volte quello della benzina o del metano. Questo significa che, in teoria, per ottenere la stessa energia sviluppata da 1 kg di benzina, basterebbero poco più di 330 grammi di idrogeno, rendendolo un combustibile estremamente efficiente dal punto di vista del peso. Altre proprietà che rendono l'idrogeno interessante per i motori endotermici sono [7]:

- Alta temperatura di autoaccensione e alto numero di ottani (RON > 130), che indicano una maggiore resistenza alla detonazione. Questo è un aspetto particolarmente positivo, poiché la detonazione può danneggiare gravemente i motori e limitarne il funzionamento in condizioni estreme
- Ampio intervallo di infiammabilità (dal 4% al 76% in volume in aria), che consente al motore di funzionare anche con miscele aria-carburante estremamente magre (coefficiente di eccesso d'aria λ da 0,14 a 10). Questa caratteristica permette un maggiore controllo delle emissioni e del rendimento.
- Elevata velocità di propagazione della fiamma, che consente una combustione rapida ed efficiente. Questo aiuta ad avvicinare il comportamento del motore a quello del ciclo Otto ideale, caratterizzato da una combustione isocora (a volume costante), che è la configurazione teoricamente più efficiente dal punto di vista termodinamico.

- Elevato coefficiente di diffusione nell'aria, che favorisce una rapida miscelazione con l'ossigeno, migliorando l'omogeneità della combustione e la reattività della miscela aria-combustibile.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'idrogeno presenta anche alcune criticità che ne limitano l'uso efficiente nei motori a combustione interna. In primo luogo, la sua bassa densità volumetrica, anche se confrontata con il metano (con cui condivide lo stato gassoso), comporta una scarsa energia contenuta per unità di volume. Questo rappresenta un serio ostacolo nelle applicazioni ad alta densità di potenza, come nei veicoli pesanti o nei trasporti a lunga percorrenza, dove il volume disponibile per il carburante è limitato. Un altro limite è rappresentato dalla temperatura adiabatica di fiamma molto elevata in condizioni stechiometriche, che favorisce la formazione di NO_x . Tuttavia, grazie alla già citata ampiezza dei limiti di infiammabilità, è possibile adottare strategie di combustione “magre” o aumentare il livello di EGR (Exhaust Gas Recirculation) per mitigare questo problema. Dal punto di vista della sicurezza, l'idrogeno ha una energia minima di accensione estremamente bassa (un ordine di grandezza inferiore rispetto ai combustibili tradizionali), il che lo rende facilmente infiammabile anche a causa di residui incandescenti o punti caldi nella camera di combustione. Questo aspetto richiede attenzioni particolari nella progettazione dei motori, soprattutto per evitare fenomeni indesiderati di accensione anticipata. Infine, la distanza di tempra (ossia la distanza oltre la quale la fiamma non riesce a propagarsi) è minore rispetto ai combustibili idrocarburici. Questo comporta una maggiore sensibilità alla geometria della camera di combustione, con gradienti di temperatura più elevati vicino alle pareti e, di conseguenza, maggiori perdite di calore, che riducono il rendimento globale del motore.

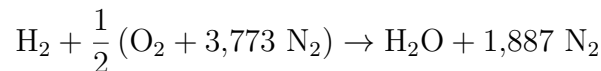
Property	Hydrogen	CNG	Gasoline	Diesel
✓ Carbon content (mass%)	0	75 ^c	84	86
✓ Lower heating value (MJ/kg)	119.7	45.8	44.8	42.5
✗ Density ^{a,b} (kg/m ³)	0.089	0.72	730–780	830
✗ Volumetric energy content ^{a,b} (MJ/m ³)	10.7	33.0	33 × 10 ³	35 × 10 ³
Molecular weight	2.016	16.043 ^c	~110	~170
Boiling point ^a (K)	20	111 ^c	298–488	453–633
✓ Auto-ignition temperature (K)	858	813 ^c	~623	~523
✗ Minimum ignition energy in air ^{a,d} (mJ)	0.02	0.29	0.24	0.24
Stoichiometric air/fuel mass ratio	34.5	17.2 ^c	14.7	14.5
Stoichiometric volume fraction in air (%)	29.53	9.48	~2 ^f	-
✗ Quenching distance ^{a,c,d} (mm)	0.64	2.1 ^c	~2	-
✓ Laminar flame speed in air ^{a,c,d} (m/s)	1.85	0.38	0.37–0.43	0.37–0.43 ^g
✓ Diffusion coefficient in air ^{a,b} (m ² /s)	8.5 × 10 ⁻⁶	1.9 × 10 ⁻⁶	-	-
✓ Flammability limits in air (vol%)	4–76	5.3–15	1–7.6	0.6–5.5
✗ Adiabatic flame temperature ^{a,c,d} (K)	2480	2214	2580	~2300

^a at 1 bar, ^b at 273 K, ^c at 298 K, ^d at stoichiometry, ^e methane, ^f vapor and ^g n-heptane.

Figura 2.2: Proprietà dell'idrogeno a confronto con gli altri combustibili [8]

2.5 Il rapporto stechiometrico dell'idrogeno

La combustione stechiometrica è quella reazione chimica in cui il combustibile e l'ossidante (aria) sono presenti nelle esatte proporzioni tali da consentire la completa ossidazione del combustibile, senza eccesso né di ossigeno né di combustibile nei prodotti della reazione. Nel caso specifico dell'idrogeno (H_2) che brucia in aria atmosferica, la reazione chimica stechiometrica può essere scritta come:



Questa forma tiene conto non solo della quantità di ossigeno necessaria alla combustione, ma anche dell'azoto presente nell'aria, che non partecipa alla reazione ma è comunque trasportato con essa. In atmosfera, infatti, l'aria è composta circa per il 20,95% in volume di ossigeno (O_2) e per il 79,05% di azoto (N_2). Per ogni mole di ossigeno disponibile, sono quindi presenti 3,773 moli di azoto. La forma bilanciata della reazione, espressa in moli complessive, diventa:

$$1 + \frac{1}{2}(1 + 3,773) = 1 + 1,887$$

Ciò implica che per 1 mole di idrogeno, sono necessarie 2,387 moli di aria, considerando l'aria come miscela di O_2 e N_2 . Questa è una quantità relativamente bassa di aria rispetto ad altri combustibili, segno che l'idrogeno ha un'elevata reattività e richiede meno ossidante per mole rispetto, ad esempio, alla benzina. Convertendo le quantità molari in masse (usando i pesi molecolari):

1. Idrogeno (H_2): 2,016 kg/kmol
2. Aria: $\approx 28,96$ kg/kmol (media ponderata tra O_2 e N_2)
3. Acqua (H_2O): 18,02 kg/kmol
4. Azoto (N_2): 28,02 kg/kmol

Applicando questi dati alla reazione:

$$(1 \cdot 2,016) + (2,387 \cdot 28,96) \rightarrow (1 \cdot 18,02) + (1,887 \cdot 28,02)$$

Il rapporto stechiometrico aria/combustibile in massa (AFR) per l'idrogeno risulta:

$$AFR_{st} = \frac{69,13}{2,016} \approx 34,3$$

Quindi, per bruciare 1 kg di idrogeno in modo stechiometrico sono necessari circa 34,3 kg di aria. Questo valore è sensibilmente più alto rispetto al classico AFR della benzina, che è di circa 14,7:1. Ciò indica che, in termini massici, l'idrogeno richiede più ossidante per una combustione completa, anche se in termini volumetrici il comportamento è molto diverso. Nonostante l'elevato potere calorifico inferiore (LHV) dell'idrogeno, pari a 120 MJ/kg, rispetto ai 44 MJ/kg della benzina, l'idrogeno presenta una densità molto più bassa, circa 0,0899 kg/m³ a 1 atm e 0 °C, il che comporta un contenuto energetico per unità di volume molto più basso.

2.6 Modalità di iniezione ed emissioni

Nel campo dell'impiego dell'idrogeno come combustibile per motori a combustione interna, due soluzioni di alimentazione risultano prevalenti: l'iniezione indiretta nel collettore di aspirazione (PFI, Port Fuel Injection) e l'iniezione diretta in camera di combustione (DI, Direct Injection). La scelta tra queste due strategie progettuali è cruciale per ottimizzare l'efficienza energetica, le prestazioni e le emissioni del motore alimentato a idrogeno [9].

L'iniezione PFI prevede la miscelazione dell'idrogeno con l'aria a monte della valvola di aspirazione, prima che il fluido entri nel cilindro. Questa configurazione è simile a quella adottata nei tradizionali motori a benzina con aspirazione naturale e rappresenta la soluzione più semplice da implementare. Tra i vantaggi principali si annoverano una buona omogeneità della miscela aria-combustibile, facilità di controllo del rapporto stechiometrico e la possibilità di lavorare con miscele molto magre. Le condizioni di combustione magra (con rapporto aria/carburante superiore a quello stechiometrico) consentono temperature di fiamma più basse, riducendo le perdite per calore verso le pareti e, soprattutto, contenendo le emissioni di NO_x. Tuttavia, l'adozione della strategia PFI comporta anche significativi limiti prestazionali: l'idrogeno, essendo un gas a bassa densità, occupa un volume non trascurabile nel collettore e nei cilindri, riducendo la quantità di aria aspirabile e quindi la potenza specifica del motore. Inoltre, il rischio di pre-accensione nel condotto di aspirazione deve essere attentamente mitigato attraverso un controllo preciso dei tempi e dei rapporti di iniezione.

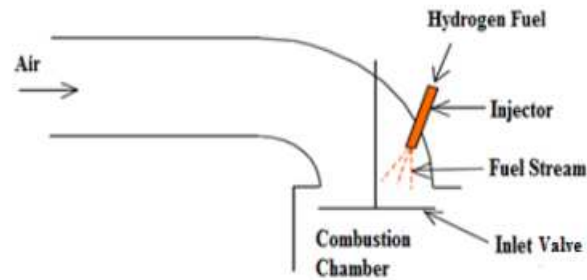


Figura 2.3: Sistema a iniezione indiretta

Per superare queste limitazioni, l'iniezione diretta (DI) rappresenta una soluzione più avanzata. In questo caso, l'idrogeno viene iniettato direttamente all'interno della camera di combustione, in genere nella fase finale della compressione. Questo metodo consente di sfruttare al massimo il potenziale energetico dell'idrogeno, evitando la sostituzione volumetrica dell'aria nel condotto di aspirazione e migliorando la densità energetica della miscela. L'iniezione diretta permette di ottenere potenze maggiori: studi riportano un incremento fino al 20% rispetto ai motori a benzina tradizionali e fino al 42% rispetto ai motori a idrogeno alimentati tramite carburatore. Inoltre, grazie alla rapidità di diffusione dell'idrogeno, l'accensione avviene quasi istantaneamente dopo l'iniezione, permettendo una gestione molto reattiva del ciclo di combustione.

Tuttavia, la tecnologia DI introduce anche nuove sfide progettuali. La ridotta finestra temporale per l'iniezione rende il processo di miscelazione meno uniforme, con la possibilità di generare zone ricche e povere all'interno della camera. Ciò può compromettere l'efficienza e aumentare il rischio di pre-accensione o detonazione localizzata. Inoltre, per garantire la corretta atomizzazione e penetrazione del getto d'idrogeno all'interno del cilindro, è necessario adottare iniettori ad alta pressione (tipicamente attorno ai 40 bar) e spesso un sistema di compressione aggiuntivo dedicato alla linea di iniezione. Tali complessità aumentano i costi e la difficoltà di integrazione con motori già esistenti, specialmente in applicazioni racing o prototipali.

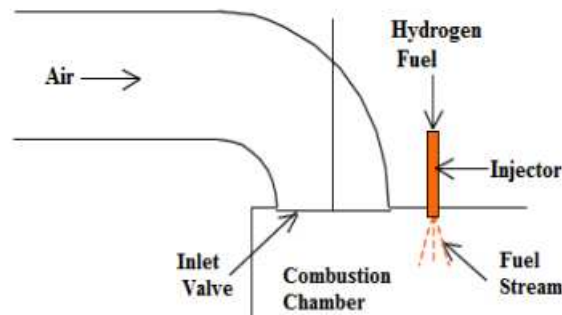


Figura 2.4: Sistema a iniezione diretta

Uno degli aspetti più rilevanti nell'impiego dell'idrogeno nei motori a combustione interna è il contenimento delle emissioni di ossidi di azoto (NO_x), che rappresentano l'unico sottoprodotto inquinante significativo quando l'idrogeno viene utilizzato come combustibile. Le emissioni di NO_x dipendono fortemente dal rapporto di equivalenza aria-carburante (Φ) e, di conseguenza, dalla temperatura di combustione. In particolare, quando si opera con miscele molto magre ($\Phi < 0,5$, corrispondente a $\lambda > 2$), le emissioni di NO_x risultano estremamente basse. Questo comportamento è dovuto al fatto che l'eccesso di aria nella camera di combustione abbassa le temperature massime al di sotto della soglia critica per la formazione significativa di NO_x , che si attesta intorno ai 1800 K. Tuttavia, all'aumentare del rapporto di equivalenza, le temperature di combustione crescono, e con esse anche la produzione di NO_x : il picco massimo di emissioni si registra tipicamente intorno a un rapporto $\Phi \approx 0,75$ ($\lambda \approx 1,3$), dove si ha un equilibrio tra temperatura elevata e sufficiente concentrazione di ossigeno disponibile per la formazione di ossidi di azoto.

In condizioni stechiometriche ($\Phi = 1$, $\lambda = 1$), le emissioni di NO_x risultano essere circa un terzo rispetto al valore massimo, ma comunque significative. È interessante notare che, sebbene le temperature di combustione più elevate si verifichino intorno a $\Phi = 1,1$, la ridotta concentrazione di ossigeno in queste condizioni limita la produzione di NO_x . Questi comportamenti non lineari hanno portato allo sviluppo di strategie operative mirate a sfruttare miscele ultra-magre (lean burn) per ridurre drasticamente le emissioni, pur mantenendo una densità di potenza accettabile. In questo contesto, il controllo accurato del rapporto di equivalenza e della strategia di iniezione diventa fondamentale per ottimizzare le prestazioni ambientali del motore a idrogeno, rendendolo una valida opzione per una mobilità più sostenibile.

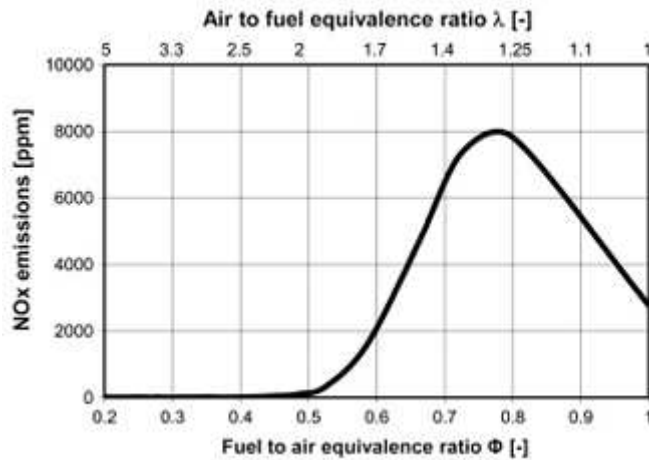


Figura 2.5: Emissioni di NO_x in funzione del rapporto aria/carburante

2.7 Lo stoccaggio dell'idrogeno

Lo stoccaggio dell'idrogeno è un aspetto cruciale nella transizione verso una mobilità sostenibile basata su questo combustibile. Ogni metodo di stoccaggio presenta vantaggi e criticità, e la scelta della tecnologia più adatta dipende dalle caratteristiche dell'applicazione e dai requisiti specifici del veicolo. In generale, i sistemi di stoccaggio dell'idrogeno si dividono in due grandi categorie: stoccaggio meccanico (o fisico) e stoccaggio chimico [10].

2.7.1 Stoccaggio meccanico (o fisico)

Nel caso dello stoccaggio fisico, l'idrogeno viene immagazzinato mantenendo inalterata la sua struttura molecolare. Questo si ottiene agendo esclusivamente sulle sue condizioni fisiche, come la pressione e la temperatura. Le tecnologie principali appartenenti a questa categoria sono:

1. Idrogeno gassoso compresso (CGH_2)

È il metodo più semplice e il più utilizzato nelle attuali vetture a idrogeno. L'idrogeno viene compresso in serbatoi ad alta pressione, tipicamente tra 350 e 700 bar, raggiungendo una densità rispettivamente di 24 g/l e 40 g/l a temperatura ambiente (20 °C). Nonostante sia una tecnologia matura, comporta importanti sfide tecniche, soprattutto legate alla sicurezza. L'alta pressione richiede l'uso di serbatoi robusti e costosi, capaci di resistere a eventuali urti o malfunzionamenti, che altrimenti potrebbero causare esplosioni. Inoltre,

la compressione dell'idrogeno richiede energia aggiuntiva, incidendo sull'efficienza complessiva del sistema.

2. Idrogeno liquido (LH_2)

In questa modalità, l'idrogeno viene raffreddato al di sotto dei 20 K (-253 °C), il punto di ebollizione, per portarlo allo stato liquido. In questa forma, ha una densità molto maggiore rispetto al gas compresso (circa 70 g/l), migliorando la capacità volumetrica di stoccaggio. Tuttavia, il mantenimento di queste temperature estremamente basse comporta un consumo energetico elevato e richiede sistemi di isolamento termico sofisticati, spesso realizzati con capsule interne, intercapedini in vuoto e materiali isolanti come lana di roccia o multistrato metallico. Uno dei problemi principali di questo sistema è il fenomeno del boil-off, ovvero l'evaporazione spontanea dell'idrogeno causata dal trasferimento di calore dall'ambiente esterno. Quando la pressione nel serbatoio supera i 6 bar, una valvola di sicurezza rilascia l'idrogeno in eccesso, con conseguente spreco di combustibile.

3. Idrogeno crio-compresso (CCH_2)

Questo sistema rappresenta un compromesso tra i due metodi precedenti, combinando alta pressione e basse temperature per ottenere densità ancora maggiori (fino a 87,5 g/l a 240 bar). I serbatoi utilizzati sono più complessi perché devono garantire sia resistenza meccanica sia isolamento termico. Tra i principali vantaggi troviamo la riduzione del fenomeno del boil-off e l'aumento della quantità di idrogeno stoccabile in uno stesso volume. Tuttavia, anche in questo caso, il consumo energetico per comprimere e raffreddare il gas è significativo, e i costi di produzione dei serbatoi risultano piuttosto elevati, anche se inferiori rispetto a quelli del solo gas compresso ad altissima pressione.

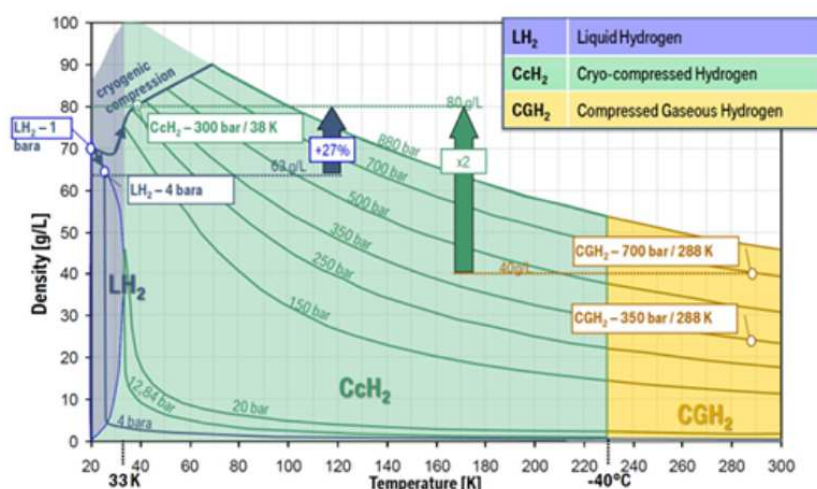


Figura 2.6: Densità dell'idrogeno al variare della temperatura [11]

2.7.2 Stoccaggio chimico

Il secondo grande approccio allo stoccaggio dell'idrogeno è quello chimico, in cui il gas non viene conservato in forma libera ma legato ad altri materiali, dai quali può essere rilasciato attraverso riscaldamento o reazioni chimiche. Questo metodo ha alcuni vantaggi significativi, soprattutto in termini di sicurezza, poiché l'idrogeno non è presente in forma gassosa ad alta pressione, e i serbatoi possono operare a pressioni e temperature relativamente più basse. Tuttavia, presenta anche delle criticità: i materiali utilizzati possono essere costosi e pesanti, e la cinetica di assorbimento e rilascio dell'idrogeno è spesso lenta, limitando la risposta dinamica del sistema. Le tecnologie principali si suddividono in due categorie:

1. Idruri: L'idrogeno viene combinato con altri elementi per formare idruri metallici o non metallici. Questi materiali possono immagazzinare grandi quantità di idrogeno, ma spesso sono molto pesanti.
2. Materiali nanostrutturati: In questo caso si sfruttano materiali con superfici molto sviluppate (a livello nanometrico), in grado di assorbire e rilasciare idrogeno in modo efficiente. Sebbene siano promettenti dal punto di vista della capacità di stoccaggio, richiedono ancora un elevato grado di sviluppo e ottimizzazione.

2.8 Vari tipi di serbatoi

Lo stoccaggio dell'idrogeno gassoso ad alta pressione rappresenta una delle soluzioni più diffuse per alimentare veicoli a idrogeno. Per garantire sicurezza, leggerezza e capacità di contenimento, sono stati sviluppati diversi tipi di serbatoi, classificati in cinque categorie principali, dalla Tipo I alla Tipo V, ciascuna con caratteristiche costruttive e prestazionali specifiche.

1. Tipo I – Serbatoi interamente metallici

I serbatoi di Tipo I sono realizzati completamente in metallo, solitamente acciaio o alluminio. Sono robusti e relativamente economici, ma presentano un peso elevato e una capacità gravimetrica limitata. A causa della loro massa significativa, sono principalmente utilizzati in applicazioni stazionarie o industriali, dove il peso non è un fattore critico. Inoltre, l'esposizione prolungata all'idrogeno può causare fenomeni di fragilimento del metallo, riducendo la durata del serbatoio.

2. Tipo II – Serbatoi metallici con rinforzi in composito

I serbatoi di Tipo II combinano un liner metallico con avvolgimenti parziali in materiale composito, generalmente fibra di vetro. Questa configurazione consente di ridurre il peso rispetto ai serbatoi interamente metallici, mantenendo una buona resistenza meccanica. Sono adatti per applicazioni che richiedono un compromesso tra peso e costo, come alcuni veicoli industriali o sistemi di stoccaggio mobili.

3. Tipo III – Liner metallico con avvolgimento completo in composito

I serbatoi di Tipo III presentano un liner sottile in metallo, solitamente alluminio, completamente avvolto da strati di materiale composito, come fibra di carbonio. Questa struttura consente di sopportare pressioni elevate, fino a 700 bar, con un peso significativamente ridotto rispetto ai tipi precedenti. Il liner metallico funge principalmente da barriera contro la permeazione dell'idrogeno, mentre il composito sopporta la maggior parte del carico strutturale. Questi serbatoi sono comunemente utilizzati nei veicoli a idrogeno, grazie al loro equilibrio tra leggerezza e resistenza.

4. Tipo IV – Liner polimerico con avvolgimento completo in composito

I serbatoi di Tipo IV rappresentano un'evoluzione tecnologica, utilizzando un liner in materiale polimerico, come il polietilene ad alta densità (HDPE), avvolto completamente da strati di composito,

tipicamente fibra di carbonio. Questa configurazione offre il vantaggio di una maggiore leggerezza e una migliore resistenza alla fatica rispetto ai serbatoi con liner metallici. Sono progettati per operare a pressioni fino a 700 bar e sono ampiamente adottati nei veicoli a idrogeno moderni, grazie alla loro efficienza e durata.

5. Tipo V – Serbatoi completamente in composito senza liner

I serbatoi di Tipo V rappresentano la frontiera più avanzata nello stoccaggio dell'idrogeno. Sono realizzati interamente in materiale composito, senza alcun liner interno, il che consente una ulteriore riduzione del peso e una maggiore capacità gravimetrica. Tuttavia, la loro produzione è complessa e attualmente sono principalmente in fase di sviluppo o utilizzati in applicazioni specialistiche, come il settore aerospaziale.

In sintesi, la scelta del tipo di serbatoio per lo stoccaggio dell'idrogeno gassoso dipende da vari fattori, tra cui l'applicazione specifica, i requisiti di peso e volume, la pressione di esercizio e i costi. I serbatoi di Tipo III e IV sono attualmente i più utilizzati nei veicoli a idrogeno, grazie al loro equilibrio tra prestazioni e costi, mentre i serbatoi di Tipo V rappresentano una promettente evoluzione per applicazioni future che richiedono massima leggerezza e capacità. [12]

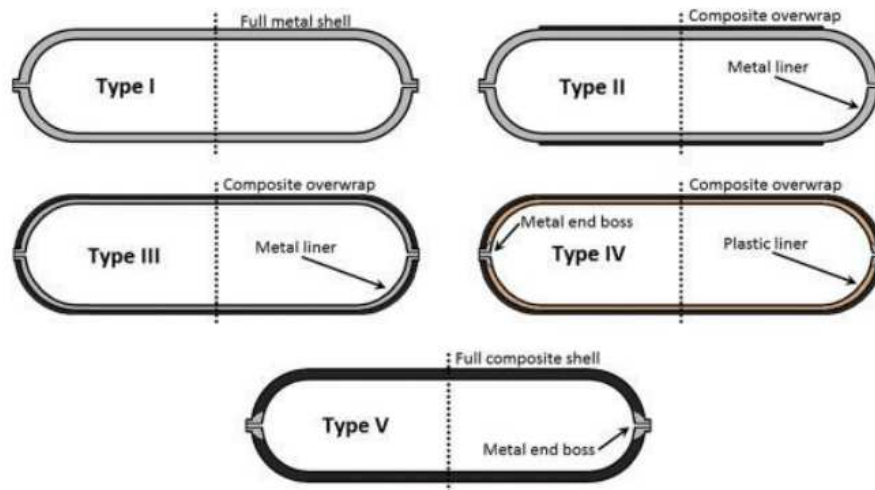


Figura 2.7: Classificazione dei serbatoi cilindrici per stoccaggio ad alta pressione.

Capitolo 3

Impostazione del layout della vettura a idrogeno

3.1 Scelta del motore

Nel processo di definizione del layout del veicolo destinato all'alimentazione a idrogeno, uno degli elementi chiave è stato rappresentato dalla scelta del motore termico da utilizzare come base di progetto. Nella versione ibrida della vettura, il propulsore impiegato era un Ducati 959, posizionato longitudinalmente, un motore ben collaudato che offriva compattezza, leggerezza e soprattutto una perfetta integrazione con il telaio posteriore della monoposto. In fase di riconfigurazione per la nuova propulsione a idrogeno, si è deciso di rimanere all'interno della stessa famiglia motoristica Ducati, individuando come soluzione ottimale il motore 1299 Superquadro. Questa scelta è stata guidata da considerazioni di tipo tecnico e pratico. Gli ingombri esterni del Ducati 1299 risultano infatti pressoché identici a quelli del 959, e, cosa ancor più rilevante, gli attacchi motore sono completamente compatibili. Questo ha permesso di evitare interventi strutturali invasivi sul telaio posteriore della vettura, un aspetto fondamentale per mantenere basso il livello di complessità progettuale e contenere i tempi e i costi di sviluppo del nuovo layout. Inoltre, il motore 1299, pur rimanendo entro il limite regolamentare di 1600 cc, grazie a una cilindrata effettiva di 1285 cc, rappresenta un significativo miglioramento in termini di capacità volumetrica rispetto al precedente 959.[13]

Cilindrata	1285 cc
Alesaggio e Corsa	116 x 60.8 mm
Potenza Max	150,8 kW @ 10500 rpm
Coppia Max	144.6 Nm @ 8750 rpm

Tabella 3.1: Caratteristiche Ducati 1299

Dal punto di vista tecnico, il Ducati 1299 è un bicilindrico a V di 90 gradi con raffreddamento a liquido e distribuzione desmodromica a quattro valvole per cilindro. L'architettura "Superquadro", da cui prende il nome, è caratterizzata da un alesaggio molto ampio rispetto alla corsa, una configurazione che consente di ottenere elevate velocità di rotazione e migliorare il riempimento volumetrico della camera di combustione. Questo tipo di impostazione costruttiva si sposa molto bene con l'esigenza di massimizzare la potenza e l'efficienza, soprattutto in un contesto in cui il combustibile utilizzato, l'idrogeno, introduce vincoli aggiuntivi dal punto di vista della miscela e del volume occupato all'interno del cilindro. Uno dei motivi principali per cui si è optato per l'aumento di cilindrata è infatti legato alla necessità di sopperire alla minore efficienza volumetrica causata dall'immissione di idrogeno in fase gassosa. A differenza della benzina, che occupa uno spazio trascurabile in forma liquida durante l'aspirazione, l'idrogeno gassoso sottrae volume utile all'aria, riducendo il potenziale di combustione. L'utilizzo di un motore di maggiore cubatura consente quindi di compensare in parte questa perdita, rendendo possibile l'utilizzo di miscele stechiometriche o debolmente magre senza compromettere in modo drastico le prestazioni. Dal punto di vista meccanico, il motore presenta una lubrificazione a carter semi-secco, una soluzione che assicura una gestione efficiente dell'olio anche in presenza di forti accelerazioni e decelerazioni, tipiche del funzionamento su pista. La configurazione interna del motore, con doppio iniettore per cilindro e ampie superfici valvolari, sarà oggetto di revisione e adattamento per permettere la conversione all'idrogeno, ma rappresenta comunque una base solida e altamente performante per questa nuova applicazione. L'elevata robustezza strutturale, unita a un buon comportamento fluidodinamico, ne fa un candidato ideale per affrontare le sfide della combustione alternativa, mantenendo al tempo stesso un buon equilibrio tra potenza specifica e affidabilità.

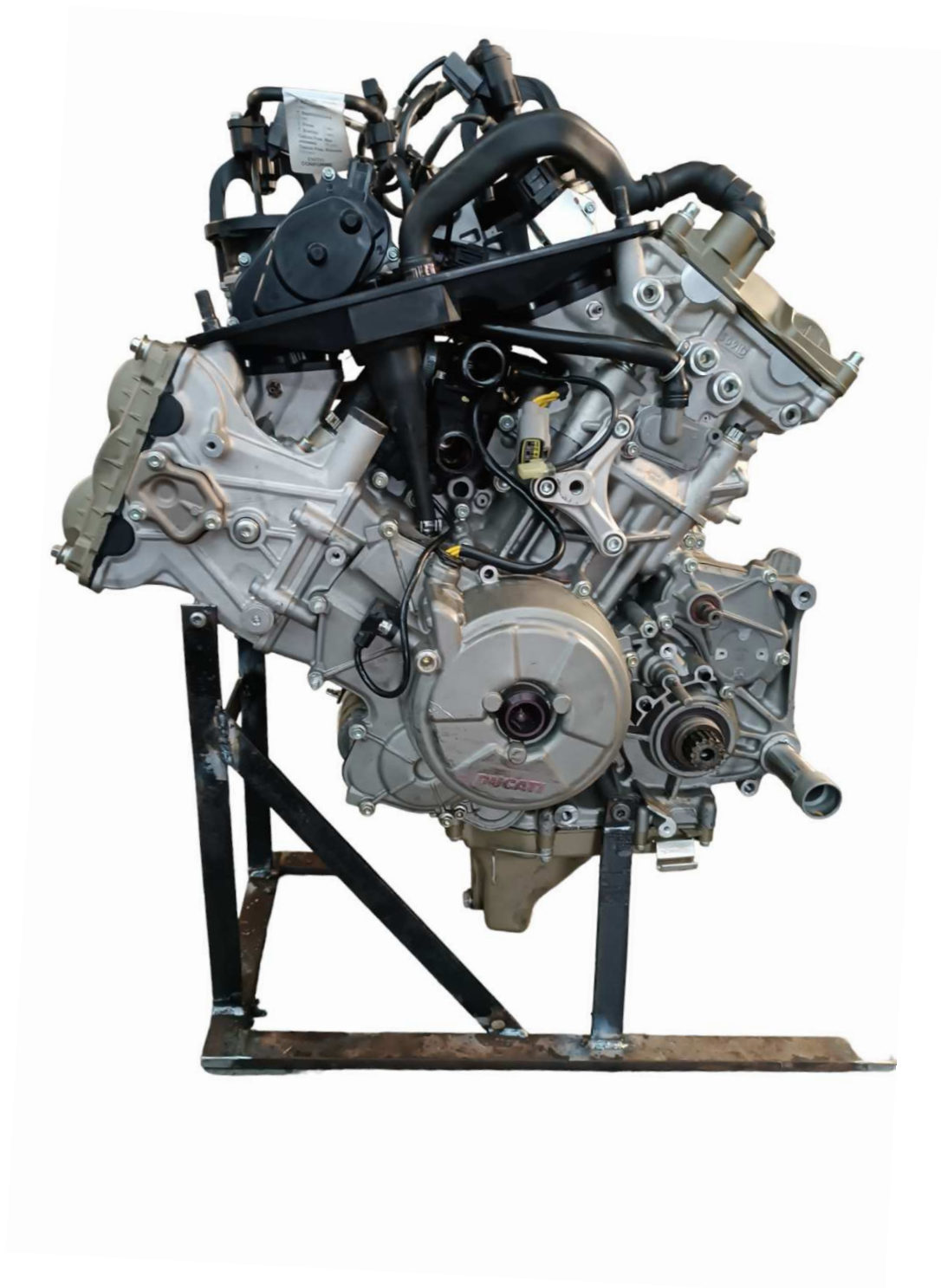


Figura 3.1: Motore Ducati 1299

A completamento della scelta del propulsore, si è deciso di mantenere il sistema di aspirazione originale del Ducati 1299, in quanto, a differenza delle vetture a combustione alimentate a benzina o etanolo, il regolamento della classe Hydrogen non impone restrizioni o limitatori sull'ingresso dell'aria. Questo ha permesso di sfruttare pienamente il potenziale volumetrico del motore, evitando perdite di efficienza legate a strozzature nel condotto. Per quanto riguarda il sistema di scarico, è stato necessario progettare ex novo la linea associata alla seconda testa, non presente nella configurazione ibrida con motore 959; in fase di sviluppo si è prestata particolare attenzione a mantenere una lunghezza equivalente a quella già esistente, al fine di garantire simmetria fluidodinamica e coerenza nei fenomeni di contropressione tra i due cilindri.



Figura 3.2: Motore Ducati 1299 con scarico e telaio

3.2 Stima dei Consumi del Motore Ducati 1299 in Configurazione ad Idrogeno

Per la nuova vettura a idrogeno, è stato scelto come base il motore Ducati 1299, un propulsore bicilindrico originariamente aspirato e alimentato a benzina. La scelta è ricaduta su questo motore per la sua compattezza, le elevate prestazioni specifiche e la compatibilità con la struttura della vettura precedente. Al fine di dimensionare correttamente il sistema di accumulo dell'idrogeno e quindi definire la quantità di combustibile necessaria per completare la prova di Endurance, che prevede un percorso di 22 km, è stato sviluppato un modello simulativo del motore in ambiente GT-POWER, software leader nel campo della simulazione termo-fluidodinamica dei propulsori. Attraverso questo modello è stato possibile stimare i consumi del motore operante in configurazione a idrogeno, valutandone il comportamento in termini di rendimento, portata d'aria e consumo specifico, fornendo così le basi per un dimensionamento accurato delle bombole a bordo. Dal modello in GT-POWER sono state ricavate le portate d'aria in aspirazione in diverse condizioni di funzionamento, fornendo così una base dati accurata per stimare i volumi d'aria effettivamente ingeriti dal motore durante un ciclo completo. A partire da queste informazioni, tramite elaborazioni successive in ambiente Excel, è stata considerata la riduzione del volume d'aria disponibile dovuta alla presenza dell'idrogeno nella miscela. Infatti, l'idrogeno, a differenza della benzina che viene iniettata in forma liquida o nebulizzata e ha una massa volumica elevata, è un gas a bassa densità che va a occupare parte del volume disponibile nel collettore di aspirazione, riducendo la quantità di comburente (aria) disponibile. Questo fenomeno può influenzare significativamente le prestazioni e la combustione, e deve essere accuratamente compensato per mantenere un'efficienza accettabile. Un ulteriore passo fondamentale per la stima del consumo è stato l'analisi delle telemetrie acquisite durante i giri prova, da cui è stato possibile determinare la percentuale di utilizzo del motore lungo il tracciato. Incrociando questi dati con il modello dinamico del motore e con le portate d'aria corrette per la presenza dell'idrogeno, è stato possibile stimare con buona accuratezza il consumo complessivo di idrogeno necessario per completare la prova di endurance.

3.3 Descrizione del modello GT-POWER

Per stimare in modo realistico i consumi del veicolo durante l'evento di Endurance, è stato sviluppato un modello dettagliato in GT-POWER del

motore Ducati 1299 V2 nella sua configurazione originale, ovvero aspirato e alimentato a benzina. Questo approccio è stato scelto per sfruttare al massimo la conoscenza già disponibile sul motore e sulle sue caratteristiche, e per permettere successivamente una conversione al funzionamento a idrogeno mantenendo una base solida e realistica. Il layout del modello riproduce fedelmente tutte le principali sezioni del motore: aspirazione, blocco motore e scarico. Una caratteristica importante da sottolineare riguarda l'ingresso dell'aria: a differenza delle configurazioni tipiche delle competizioni Formula Student con motori a combustione interna alimentati a benzina o etanolo, in questo caso non è stata inserita alcuna restrizione sull'aspirazione dell'aria. Questo perché nel passaggio all'alimentazione a idrogeno non sono previsti limiti regolamentari di questo tipo, e, anzi, una maggiore portata d'aria è necessaria per compensare l'effetto di spiazzamento volumetrico causato dall'idrogeno in camera di combustione. Il modello sviluppato in GT-POWER prende avvio dalla simulazione del sistema di aspirazione, che riproduce il flusso d'aria in ingresso attraverso una linea priva di restrizioni, con condotti dimensionati secondo il layout originale del motore Ducati 1299. All'interno di questo sistema viene integrata la simulazione del corpo farfallato, il cui angolo di apertura è stato variato in modo da esplorare un ampio spettro di condizioni operative. In particolare, si parte da un'apertura minima di 13.5° , rappresentativa del regime minimo del motore, fino a raggiungere i 90° , corrispondenti alla massima apertura e quindi al carico massimo. Questa variazione consente di analizzare in dettaglio il comportamento fluidodinamico del motore in tutte le principali condizioni di funzionamento, dalla marcia al minimo fino alla piena accelerazione. Successivamente, il flusso entra nella parte centrale del modello, che rappresenta il motore vero e proprio. Qui sono stati inseriti i dati geometrici e meccanici del Ducati 1299, come la cilindrata, il profilo delle valvole, la fasatura e il rapporto di compressione. Il ciclo termodinamico è stato lasciato nella configurazione a benzina, così da poter confrontare in un secondo momento le differenze nei parametri di funzionamento una volta convertito all'idrogeno. L'ultima parte del layout riguarda il sistema di scarico, modellato anch'esso per replicare le perdite di carico e la dinamica dei gas esausti, in modo da ottenere risultati coerenti con le condizioni reali del motore. Le simulazioni sono state eseguite in un ampio intervallo di regimi motore, da 4000 a 11.000 rpm, e per diversi angoli di apertura della farfalla. Questo ha permesso di costruire una vera e propria mappa operativa del motore, in cui per ogni coppia di valori (giri motore e apertura farfalla) è stata calcolata la portata d'aria aspirata. È importante sottolineare che il modello del Ducati 1299 è stato mantenuto nella sua configurazione a benzina non solo per coerenza con la base dati esistente, ma anche per motivazioni

di ordine pratico. Infatti, il punto di partenza per lo sviluppo del modello è stato il motore Ducati 959 precedentemente utilizzato nella configurazione ibrida della vettura, già modellato in GT-POWER. Da tale modello sono stati aggiornati e modificati tutti i parametri geometrici e termodinamici necessari per rappresentare fedelmente il propulsore 1299, mantenendo però l'intero impianto simulativo già validato. La scelta di non procedere direttamente alla modellazione della combustione a idrogeno è stata dettata dalla complessità intrinseca di tale processo: sviluppare un modello realistico richiede infatti dati sperimentali approfonditi per la calibrazione della cinetica chimica, delle curve di rilascio dell'energia e delle specifiche condizioni di accensione, informazioni che non erano disponibili al momento dello studio. Inoltre, impostare e validare un modello completamente dedicato alla combustione a idrogeno avrebbe richiesto tempi significativamente più lunghi, incompatibili con le tempistiche del progetto. Per questi motivi, si è scelto di utilizzare il modello a benzina come base solida su cui eseguire valutazioni preliminari di portata d'aria e consumo, in vista di una successiva conversione concettuale all'idrogeno.

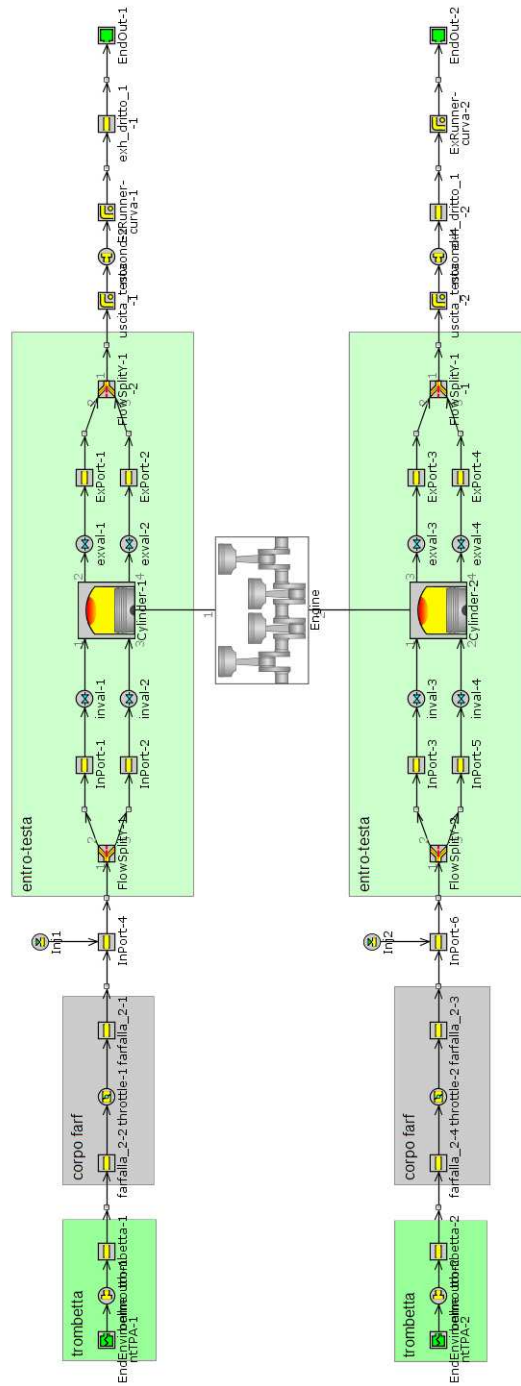


Figura 3.3: Modello GT-POWER Ducati 1299

3.4 Stima dei consumi attraverso Excel

A partire dai risultati ottenuti tramite il modello GT-POWER del motore Ducati 1299 V2 nella configurazione a benzina, è stata ricavata una tabella completa della portata d'aria aspirata in tutte le condizioni operative del motore. In particolare, i dati sono stati organizzati in funzione di due variabili fondamentali: il numero di giri motore (RPM), esplorato in un range da 4000 a 11.000 rpm, e l'angolo di apertura della farfalla, variato da 13.5° fino a 90°, così da coprire un ampio spettro di situazioni di carico e regime. Questa tabella è stata poi esportata in Excel per una successiva elaborazione, con l'obiettivo di stimare in modo realistico la portata di idrogeno che il motore convertito potrà effettivamente gestire.

		Engine RPM														
TPS	TH.Angle	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
15	13.5	18.57	23.79	26.51	28.35	28.86	30.48	30.61	31.13	33.07	35.37	36.96	37.26	36.70	37.84	38.52
20	18	21.96	28.03	30.79	32.09	32.09	33.69	33.71	34.60	37.39	40.67	43.86	46.23	46.22	47.70	50.01
25	22.5	28.30	35.70	38.45	39.31	38.34	39.28	39.13	40.60	43.53	46.90	50.11	53.33	54.24	55.52	57.96
30	27	32.22	40.68	43.92	44.61	43.19	43.83	43.59	45.70	49.11	52.71	55.63	59.20	60.85	62.09	64.88
35	31.5	34.92	44.35	48.28	49.47	47.68	48.26	48.85	51.39	54.74	58.36	61.61	66.75	70.14	71.33	72.90
40	36	36.12	46.17	51.22	52.85	51.70	52.25	53.52	56.92	60.64	64.07	67.10	73.80	78.17	80.22	81.92
45	40.5	35.86	46.92	53.37	56.09	56.00	58.18	60.39	64.76	69.75	73.94	77.80	85.77	89.36	91.61	93.88
50	45	35.34	46.77	53.46	57.01	57.16	60.79	63.92	68.94	74.73	79.69	85.01	93.22	96.49	98.57	100.56
55	49.5	35.08	46.40	53.09	57.32	57.56	62.25	66.66	72.30	78.72	84.80	91.81	99.72	103.13	105.22	107.01
60	54	35.36	45.60	52.23	56.95	57.59	62.53	69.31	76.21	83.11	91.28	100.97	108.20	112.31	114.93	116.80
65	58.5	35.60	45.20	51.92	56.66	57.55	62.21	69.70	77.48	84.43	93.04	103.77	111.11	115.42	118.35	120.53
70	63	35.65	44.21	51.50	55.87	57.04	61.39	68.94	79.77	87.15	95.22	108.24	116.84	121.53	124.91	128.03
75	67.5	35.16	43.91	51.61	55.15	56.21	61.18	67.62	79.72	89.24	96.00	109.10	119.77	125.13	128.42	131.78
80	72	34.85	44.15	51.77	54.52	55.35	60.71	66.89	77.59	91.34	97.23	108.50	120.71	128.18	131.21	134.28
85	76.5	35.10	44.77	50.98	54.28	54.52	59.70	67.06	75.51	91.87	99.02	108.02	119.97	129.78	133.54	135.96
90	81	35.23	45.07	50.43	54.34	54.27	59.11	67.23	74.83	91.12	100.03	108.05	119.39	129.96	134.63	136.67
95	85.5	35.21	45.17	49.84	54.57	54.07	58.44	67.11	74.29	89.43	101.46	108.38	118.62	129.64	135.94	137.69
100	90	35.11	45.09	49.67	54.74	53.98	58.14	66.84	74.19	88.38	102.08	108.64	118.32	129.30	136.41	138.20

Figura 3.4: Portata d'aria in g/s del Ducati 1299 a benzina

A questo scopo, per ogni punto della tabella è stato applicato un fattore moltiplicativo correttivo, sempre inferiore a 1, che tiene conto della riduzione della quantità d'aria aspirabile causata dall'iniezione di idrogeno gassoso nella camera di combustione. Questo fattore è stato calcolato a partire dall'analisi dei volumi, considerando che il volume totale del cilindro è occupato dalla somma del volume di aria e del volume di idrogeno. Conoscendo il valore di lambda impostato, è stato possibile risalire alla quantità di idrogeno presente e, di conseguenza, determinare il volume effettivo disponibile per l'aria, da cui deriva il fattore correttivo applicato. Infatti il volume della camera di combustione, indicato con V_{cil} , è dato dalla seguente formula [14]:

$$V_{cil} = V_{air} + V_{H_2} = \frac{m_{air}}{\rho_{air}} + \frac{m_{H_2}}{\rho_{H_2}} \quad (3.1)$$

dove:

- V_{cil} equivale alla cilindrata unitaria di 642,5 cc;
- V_{air} indica il volume in camera occupato dall'aria;
- V_{H_2} indica il volume di idrogeno;
- m_{air} indica la massa d'aria;
- m_{H_2} indica la massa d'idrogeno;
- ρ_{air} indica la densità dell'aria equivalente a 1,225 kg/m³;
- ρ_{H_2} indica la densità dell'idrogeno equivalente a 0,08375 kg/m³ calcolato a temperatura e pressione ambiente, rispettivamente 20°C e 1 bar.

La massa d'aria può essere riscritta, secondo la formula 3.2, usando il rapporto stechiometrico A/F_s dell'idrogeno uguale a 34,3 e il valore di λ [15].

$$m_{\text{air}} = \frac{A}{F_s} \cdot \lambda \cdot m_{\text{H}_2} \quad (3.2)$$

Percio l'equazione 3.1 può essere riscritta come:

$$V_{\text{cil}} = \frac{m_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} + \frac{m_{\text{air}}}{\rho_{\text{H}_2} \cdot \frac{A}{F_s} \cdot \lambda} \quad (3.3)$$

A questo punto possiamo ricavare la massa di aria contenuta nel cilindro attraverso la formula:

$$m_{\text{air}} = \frac{V_{\text{cil}}}{\frac{1}{\rho_{\text{air}}} + \frac{1}{\rho_{\text{H}_2} \cdot \frac{A}{F_s} \cdot \lambda}} \quad (3.4)$$

Infine facendo il rapporto fra i volumi otteniamo il rendimento volumetrico λ_v che varia in funzione di lambda.

$$\lambda_v = \frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{cil}}} \quad (3.5)$$

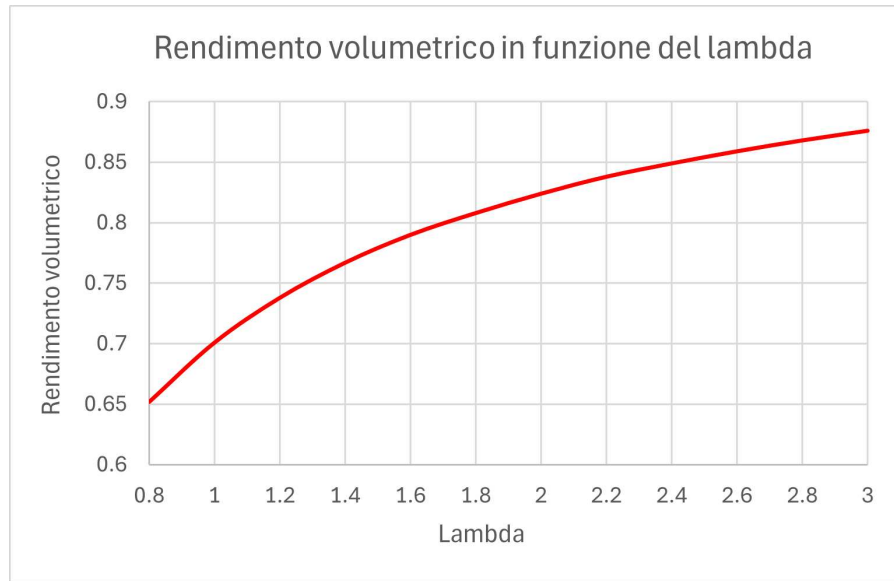


Figura 3.5: Rendimento volumetrico in funzione del lambda

Si osserva che, nel caso di miscele stechiometriche o ricche, la massa d'aria presente nel cilindro si riduce di circa il 30%. Tale riduzione diminuisce progressivamente all'aumentare della magrezza della miscela. Per tener conto di questo effetto quando si passa dall'iniezione di benzina a quella di idrogeno, si introduce il rendimento volumetrico λ_v , definito per un determinato valore di lambda ($\lambda=2$). Questo coefficiente viene applicato a ciascun termine della tabella, moltiplicandoli, al fine di ottenere la corretta portata d'aria in presenza di idrogeno.

		Engine RPM														
TPS	TH.Angle	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
15	13.5	15.58	19.95	22.23	23.78	24.20	25.56	25.67	26.11	27.73	29.66	31.00	31.25	30.78	31.73	32.30
20	18	18.42	23.51	25.82	26.92	26.91	28.25	28.27	29.01	31.35	34.11	36.79	38.77	38.76	40.00	41.94
25	22.5	23.74	29.94	32.25	32.97	32.15	32.94	32.82	34.05	36.50	39.33	42.02	44.73	45.48	46.56	48.60
30	27	27.02	34.12	36.84	37.41	36.22	36.75	36.55	38.32	41.18	44.21	46.65	49.65	51.03	52.07	54.41
35	31.5	29.29	37.19	40.49	41.49	39.99	40.47	40.97	43.10	45.91	48.94	51.66	55.98	58.82	59.82	61.13
40	36	30.29	38.72	42.95	44.32	43.36	43.82	44.89	47.73	50.85	53.73	56.27	61.89	65.55	67.27	68.70
45	40.5	30.08	39.35	44.76	47.03	46.96	48.79	50.64	54.31	58.49	62.01	65.25	71.93	74.94	76.82	78.73
50	45	29.64	39.22	44.83	47.81	47.93	50.98	53.61	57.82	62.67	66.83	71.29	78.18	80.92	82.66	84.33
55	49.5	29.42	38.91	44.52	48.07	48.27	52.20	55.90	60.63	66.01	71.11	77.00	83.63	86.48	88.24	89.74
60	54	29.65	38.24	43.80	47.76	48.30	52.44	58.12	63.91	69.70	76.55	84.68	90.74	94.18	96.38	97.95
65	58.5	29.85	37.91	43.54	47.52	48.26	52.17	58.45	64.98	70.81	78.02	87.02	93.18	96.79	99.25	101.08
70	63	29.90	37.08	43.19	46.85	47.83	51.48	57.82	66.90	73.08	79.86	90.77	97.98	101.92	104.75	107.37
75	67.5	29.49	36.83	43.28	46.25	47.14	51.31	56.71	66.85	74.84	80.51	91.50	100.44	104.94	107.69	110.51
80	72	29.22	37.02	43.42	45.72	46.41	50.92	56.09	65.07	76.60	81.54	90.99	101.23	107.49	110.03	112.61
85	76.5	29.44	37.54	42.75	45.52	45.72	50.07	56.24	63.32	77.05	83.04	90.59	100.61	108.83	111.99	114.01
90	81	29.55	37.80	42.29	45.57	45.51	49.57	56.38	62.75	76.41	83.89	90.62	100.12	108.99	112.90	114.61
95	85.5	29.53	37.88	41.80	45.76	45.34	49.01	56.28	62.31	75.00	85.08	90.89	99.48	108.72	114.00	115.47
100	90	29.45	37.81	41.65	45.91	45.27	48.75	56.05	62.22	74.11	85.60	91.11	99.22	108.43	114.40	115.90

Figura 3.6: Portata d'aria in g/s del Ducati 1299 a idrogeno

Conoscendo la portata d'aria e il valore di λ , è possibile utilizzare la formula inversa per calcolare la portata di idrogeno. In questo modo, partendo dalla portata d'aria misurata e dal coefficiente λ , si ricava la quantità di idrogeno necessaria per la miscela desiderata.

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{air}}{\left(\frac{A}{F_s} \cdot \lambda\right)} \quad (3.6)$$

		Engine RPM														
TPS	TH.Angle	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
15	13.5	0.218	0.279	0.311	0.332	0.338	0.357	0.359	0.365	0.388	0.415	0.433	0.437	0.430	0.444	0.452
20	18	0.258	0.329	0.361	0.376	0.376	0.395	0.395	0.406	0.438	0.477	0.514	0.542	0.542	0.559	0.586
25	22.5	0.332	0.419	0.451	0.461	0.449	0.461	0.459	0.476	0.510	0.550	0.587	0.625	0.636	0.651	0.680
30	27	0.378	0.477	0.515	0.523	0.506	0.514	0.511	0.536	0.576	0.618	0.652	0.694	0.713	0.728	0.761
35	31.5	0.409	0.520	0.566	0.580	0.559	0.566	0.573	0.603	0.642	0.684	0.722	0.783	0.822	0.836	0.855
40	36	0.423	0.541	0.601	0.620	0.606	0.613	0.628	0.667	0.711	0.751	0.787	0.865	0.916	0.941	0.961
45	40.5	0.421	0.550	0.626	0.658	0.657	0.682	0.708	0.759	0.818	0.867	0.912	1.006	1.048	1.074	1.101
50	45	0.414	0.548	0.627	0.668	0.670	0.713	0.749	0.808	0.876	0.934	0.997	1.093	1.131	1.156	1.179
55	49.5	0.411	0.544	0.622	0.672	0.675	0.730	0.782	0.848	0.923	0.994	1.076	1.169	1.209	1.234	1.255
60	54	0.415	0.535	0.612	0.668	0.675	0.733	0.813	0.894	0.974	1.070	1.184	1.269	1.317	1.348	1.369
65	58.5	0.417	0.530	0.609	0.664	0.675	0.729	0.817	0.908	0.990	1.091	1.217	1.303	1.353	1.388	1.413
70	63	0.418	0.518	0.604	0.655	0.669	0.720	0.808	0.935	1.022	1.116	1.269	1.370	1.425	1.464	1.501
75	67.5	0.412	0.515	0.605	0.647	0.659	0.717	0.793	0.935	1.046	1.126	1.279	1.404	1.467	1.506	1.545
80	72	0.409	0.518	0.607	0.639	0.649	0.712	0.784	0.910	1.071	1.140	1.272	1.415	1.503	1.538	1.574
85	76.5	0.412	0.525	0.598	0.636	0.639	0.700	0.786	0.885	1.077	1.161	1.267	1.407	1.522	1.566	1.594
90	81	0.413	0.528	0.591	0.637	0.636	0.693	0.788	0.877	1.068	1.173	1.267	1.400	1.524	1.578	1.602
95	85.5	0.413	0.530	0.584	0.640	0.634	0.685	0.787	0.871	1.049	1.190	1.271	1.391	1.520	1.594	1.614
100	90	0.412	0.529	0.582	0.642	0.633	0.682	0.784	0.870	1.036	1.197	1.274	1.387	1.516	1.599	1.620

Figura 3.7: Portata di idrogeno in g/s

Dopo aver costruito questa nuova mappa della portata di idrogeno, è stato fondamentale integrare i dati con le informazioni telemetriche raccolte sul tracciato dell'endurance della competizione in Austria 2024. In particolare, dalla telemetria di un giro di riferimento durante l'endurance, è stata determinata la percentuale di tempo trascorso in ciascun punto operativo della mappa. Questo ha permesso di ponderare ogni valore della portata di idrogeno in base alla reale frequenza di utilizzo nel ciclo di guida.

Impostazione del layout della vettura a idrogeno

		Engine RPM														
T P S		4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
	15	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.5	0.7	1.5	1.1	1.1	1.5	1.3	0.6	0.7	0.2
	20	0	0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.9	0.6	1.1	0.8	0.8	0.7	0.4	0.1	0.3
	25	0	0	0.1	0	0.3	1.2	2.2	0.5	0.4	0.3	0.6	0.1	0	0	0.2
	30	0	0	0	0	0.2	0.5	1.1	1.1	0.5	0.1	0.3	0.5	0	0	0.1
	35	0	0.1	0	0	0.1	0.4	0.6	1.2	0.6	0.3	0.8	0.5	0	0	0
	40	0	0	0	0	0.1	0.5	0.7	1.2	0.3	0.2	0.6	0.7	0.1	0.1	0
	45	0	0	0	0	0	0.3	0.5	0.8	0.4	0.4	0.8	0.2	0	0	0
	50	0	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.8	0.5	0.4	0.7	0.8	0	0.1
	55	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.6	0.4	0.7	0.7	0.3	0
	60	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.3	0.1	0.5	0.2	0.5	0.4	0.2	0
	65	0	0	0	0.1	0	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3	0	0
	70	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.4	0	0.1	0
	75	0	0	0	0	0	0.1	0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0
	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0	0
	85	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0	0.1	0	0	0
	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.1	0
	95	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0	0
	100	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.1	0.6	1	1.6	3.1	2.9	3.3	3.3

Figura 3.8: Percentuale di utilizzo in un giro di Endurance

Viene, inoltre, attivato il cut-off, una modalità della centralina che interrompe l'immissione di carburante agli iniettori con l'obiettivo di ridurre i consumi. Tuttavia, qualora il numero di giri dovesse scendere eccessivamente, il sistema disattiva automaticamente il cut-off per evitare lo spegnimento del motore.

		Engine RPM														
TPS	TH.Angle	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
15	13.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	22.5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
30	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
35	31.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	40.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
55	49.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60	54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	58.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
75	67.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80	72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
85	76.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
95	85.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.9: Strategia di fuel cut-off

Moltiplicando ciascuna portata istantanea per il tempo relativo di utilizzo, per il valore della strategia di fuel cut-off (FC) e sommando tutti i contributi, si è ottenuta una stima del consumo di idrogeno per un singolo giro. Questo approccio tiene quindi conto non solo del comportamento teorico del motore, ma anche della reale strategia di guida adottata sul circuito.

$$\text{Consumo}_{\text{giro}} = \sum_i \sum_j \dot{m}_{H_{2i,j}} \cdot t_{i,j} \cdot FC_{i,j} \quad (3.7)$$

TPS	TH.Angle	Engine RPM														
		4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
15	13.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	22.5	0.000	0.000	0.047	0.000	0.140	0.576	1.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.105	0.268	0.586	0.614	0.300	0.064	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
35	31.5	0.000	0.054	0.000	0.000	0.058	0.236	0.358	0.753	0.401	0.214	0.602	0.408	0.000	0.000	0.000
40	36	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063	0.319	0.458	0.834	0.222	0.156	0.492	0.631	0.095	0.098	0.000
45	40.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.213	0.369	0.633	0.341	0.361	0.760	0.210	0.000	0.000	0.000
50	45	0.000	0.000	0.000	0.000	0.070	0.074	0.156	0.084	0.730	0.487	0.415	0.797	0.943	0.000	0.123
55	49.5	0.000	0.000	0.000	0.070	0.070	0.076	0.081	0.353	0.096	0.621	0.448	0.852	0.882	0.386	0.000
60	54	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.076	0.085	0.279	0.102	0.557	0.247	0.661	0.549	0.281	0.000
65	58.5	0.000	0.000	0.000	0.069	0.000	0.000	0.085	0.095	0.206	0.227	0.507	0.407	0.423	0.000	0.000
70	63	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.084	0.097	0.426	0.233	0.132	0.571	0.000	0.153	0.000
75	67.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.075	0.000	0.292	0.327	0.234	0.133	0.439	0.153	0.314	0.000
80	72	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.112	0.119	0.133	0.295	0.313	0.000	0.000	0.000
85	76.5	0.000	0.000	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000	0.112	0.242	0.000	0.147	0.000	0.000	0.000	0.000
90	81	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.132	0.000	0.000	0.164	0.000	0.000
95	85.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.071	0.000	0.000	0.109	0.124	0.265	0.145	0.000	0.000	0.000
100	90	0.000	0.000	0.000	0.067	0.066	0.000	0.000	0.091	0.648	1.247	2.123	4.479	4.579	5.498	5.576

Figura 3.10: Consumo durante un giro

Infine, moltiplicando il consumo per giro per il numero totale di giri necessari a percorrere i 22 km della prova endurance, è stato possibile calcolare in modo accurato il consumo totale previsto di idrogeno per l'intera gara.

$$\text{Consumo}_{\text{totale}} = \text{Consumo}_{\text{giro}} \times n_{\text{giri}} = 958.9g \quad (3.8)$$

A valle dello studio condotto tramite il modello GT-POWER, integrato con successive elaborazioni in ambiente Excel, è stato possibile stimare il consumo di idrogeno necessario per completare l'evento di Endurance, assumendo un rapporto di miscela (λ) pari a 2. In queste condizioni operative, il consumo risultante è pari a circa 958.9 grammi per coprire l'intero tracciato di 22 km.

Per garantire un adeguato margine di sicurezza, sia in termini di eventuali variazioni nelle condizioni reali di utilizzo sia per tenere conto di possibili inefficienze non considerate nel modello, si è deciso di sovradimensionare leggermente il sistema di accumulo. Pertanto, la massa di idrogeno da imbarcare a bordo è stata fissata in via cautelativa a 1,2 kg, assicurando così la possibilità di completare la prova senza rischi legati a una carenza di carburante. Al termine di tutto il processo di calcolo, a partire dal modello GT-POWER e successiva elaborazione in Excel, si ottiene il consumo totale di idrogeno espresso in grammi necessario per completare la prova endurance, che nel nostro caso corrisponde a una distanza totale di 22 km. A questo punto, è fondamentale convertire questo valore di massa in un volume di gas compresso, così da poter definire con precisione la capacità dei serbatoi da installare sul veicolo. Per compiere questa conversione, è stato considerato il comportamento reale dell'idrogeno compresso, ipotizzando una pressione di esercizio di 350 bar, valore tipico per applicazioni automobilistiche in cui si preferisce un compromesso tra capacità e sicurezza. Tuttavia, a queste

pressioni l'idrogeno non si comporta più come un gas perfetto: è quindi necessario tenere conto del fattore di comprimibilità Z , che per l'idrogeno a 350 bar e temperatura ambiente può essere assunto pari a $Z = 1.2$. [16]

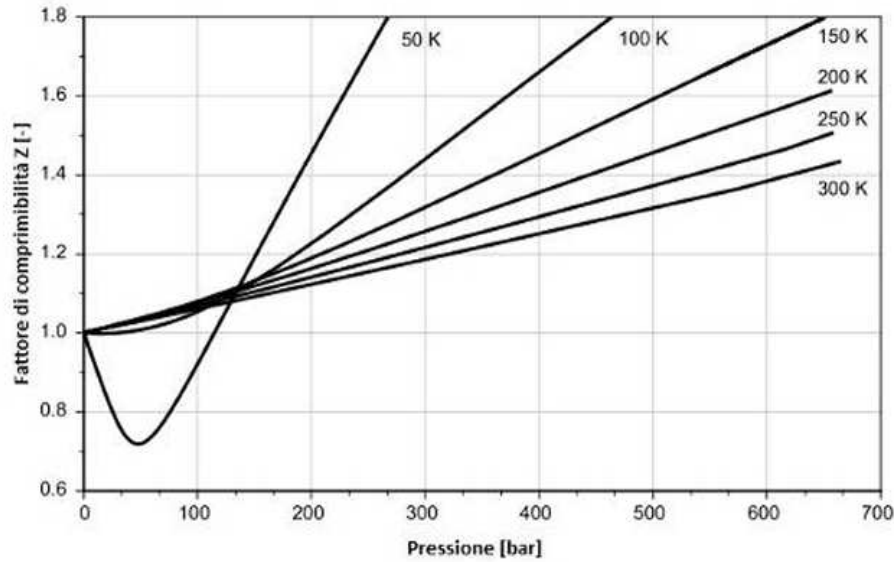


Figura 3.11: Fattore di comprimibilità dell'idrogeno

La relazione utilizzata per determinare il volume necessario di gas è la seguente:

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T \cdot Z}{M \cdot p} \quad (3.9)$$

Dove:

- V è il volume in m^3 ;
- m è la massa di idrogeno in kg;
- R è la costante universale dei gas $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$;
- T è la temperatura assoluta assunta 298 K;
- M è la massa molare dell'idrogeno 2.016 g/mol;
- p è la pressione di stoccaggio in Pa ($350 \text{ bar} = 35 \cdot 10^6 \text{ Pa}$);
- Z è il fattore di comprimibilità;

Tuttavia, per semplificare il calcolo ed esprimere direttamente il volume in litri, si può ricorrere ai dati empirici presenti in letteratura. In particolare, si assume che la densità dell'idrogeno compresso a 350 bar e 20°C sia circa 24 g/L, tenendo conto del fattore Z. Conoscendo la massa di idrogeno richiesta è possibile determinare il volume necessario come:

$$V_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{\rho_{H_2}} = 50l \quad (3.10)$$

3.5 Scelta delle bombole

Una volta ottenuta una stima della quantità di idrogeno necessaria per completare l'evento di endurance, stimata intorno ai 1.2 kg attraverso i calcoli derivati dal modello GT-Power del motore Ducati 1299 e dal successivo lavoro su Excel, si è passati alla selezione del sistema di stoccaggio dell'idrogeno a bordo della vettura. Questo è un passaggio cruciale, in quanto il sistema di serbatoi non solo deve essere in grado di contenere il gas in condizioni di sicurezza, ma deve anche integrarsi efficacemente nel layout complessivo del veicolo, rispettando al contempo i vincoli regolamentari imposti dalla Formula Student. Dopo un'attenta valutazione tecnica ed ergonomica, si è optato per l'utilizzo di bombole di Tipo III, cioè serbatoi costituiti da un liner interno metallico (solitamente in alluminio) completamente avvolto in materiale composito come la fibra di carbonio. Questa tipologia rappresenta un buon compromesso tra prestazioni e sicurezza: garantisce infatti un'ottima resistenza meccanica alle pressioni elevate, in questo caso 350 bar, mantenendo al tempo stesso una buona leggerezza complessiva, anche se con un peso leggermente superiore rispetto alle bombole di Tipo IV, ma una maggiore compattezza. La scelta delle bombole di Tipo III è stata dettata non solo da considerazioni strutturali, ma anche dalla maggiore affidabilità e familiarità costruttiva di questo tipo di serbatoi, che presentano una migliore gestione della permeabilità rispetto a liner puramente plastici. Inoltre, la maggiore rigidità del liner metallico ha rappresentato un vantaggio nel posizionamento fisico e nella sicurezza meccanica durante l'installazione nel telaio del veicolo. In base ai risultati dei calcoli sul consumo, e considerando la densità reale dell'idrogeno a 350 bar con un fattore di comprimibilità Z pari a 1.2, il volume necessario per immagazzinare l'idrogeno richiesto è risultato essere di circa 50 litri. Per soddisfare questa esigenza, si è progettata una configurazione composta da tre bombole: due da 20 litri ciascuna, posizionate all'interno delle pance laterali della vettura, e una da 10 litri collocata sotto il firewall, esattamente dove in precedenza era alloggiata la batteria del sistema ibrido. Questa

distribuzione ha permesso di sfruttare al meglio gli spazi disponibili, evitando modifiche invasive al telaio esistente, e mantenendo un baricentro basso, cosa fondamentale per garantire buone prestazioni dinamiche. Il posizionamento sotto il firewall, in particolare, ha rappresentato una soluzione intelligente per utilizzare un'area precedentemente destinata a componenti critici, già strutturalmente rinforzata e adeguatamente protetta da eventuali urti o fonti di calore. Dal punto di vista normativo, la scelta e il posizionamento delle bombole rispettano in pieno le prescrizioni tecniche del regolamento Formula Student, che impone il rispetto di specifici standard di sicurezza per i sistemi di accumulo ad alta pressione. Le bombole sono omologate secondo le normative internazionali e dotate di tutte le valvole di sicurezza, come il PRD (Pressure Relief Device), obbligatorio in caso di surriscaldamento. È stato verificato anche che l'installazione non interferisca con la cella di sicurezza, e che tutte le linee di alimentazione siano protette da eventuali impatti e correttamente isolate termicamente. L'utilizzo di bombole di Tipo III ha quindi rappresentato una soluzione equilibrata, in grado di soddisfare sia i requisiti tecnici che quelli normativi, con un'integrazione efficace nel layout della vettura, senza compromettere l'equilibrio dinamico né la sicurezza globale del sistema.



Figura 3.12: Bombole per idrogeno Tipo III [17]

3.6 Sidepods strutturali

Per il posizionamento delle bombole di idrogeno, è stata adottata una soluzione che bilanciassero criteri di sicurezza, distribuzione dei pesi, semplicità costruttiva e conformità regolamentare. In particolare, si è optato per l'installazione di due bombole da 20 litri ciascuna all'interno delle pance laterali della vettura.

In fase preliminare era stata valutata un'alternativa che prevedeva il posizionamento delle bombole nella parte posteriore del veicolo, in una zona immediatamente sopra il motore a combustione. Questa configurazione avrebbe richiesto una modifica strutturale del telaio posteriore, con l'aggiunta di una struttura dedicata, progettata ad hoc per sostenere e contenere le bombole. Tuttavia, tale soluzione presentava importanti criticità: in primo luogo, avrebbe comportato un aumento significativo della massa complessiva, concentrata oltretutto in una zona elevata e arretrata della vettura, andando a penalizzare la dinamica del veicolo sia in termini di baricentro che di distribuzione dei pesi. In secondo luogo, avrebbe introdotto maggiori complessità costruttive e manutentive, rendendo meno agevoli le operazioni di montaggio e ispezione.

Considerando tali svantaggi e sfruttando il fatto che il regolamento tecnico per la classe Hydrogen consente esplicitamente il posizionamento delle bombole all'interno delle pance, si è optato per una soluzione più efficiente e bilanciata, sia dal punto di vista tecnico che progettuale. Si è quindi avviato lo studio delle pance laterali, concepite non più come semplici carenature aerodinamiche, ma come vere e proprie strutture portanti in grado di garantire protezione meccanica in caso di impatto. In particolare, è stato progettato un layout che rispetti le prescrizioni regolamentari in termini di protezione frontale, laterale e posteriore: per questo motivo, le pareti delle pance presentano spessori identici a quelli del monoscocca, così da offrire un livello di protezione equivalente.

Dal punto di vista geometrico, la pancia è stata modellata con una forma a "semi-C", aperta nella parte superiore per permettere la facile estrazione della bombola in caso di necessità. La sezione è stata sagomata in modo da aderire il più possibile al profilo delle bombole, minimizzando gli ingombri e limitando l'impatto sul peso complessivo del veicolo. Inoltre, nella zona anteriore dove sono posizionati gli OTD, è stata realizzata una rastrematura che consente di non compromettere eccessivamente l'aerodinamica laterale del veicolo.



Figura 3.13: Sidepod strutturale

Il progetto ha previsto la realizzazione di una struttura monolitica in materiale composito per le pance laterali, ispirata alla laminazione già adottata per il monoscocca. Ogni pancia è stata realizzata come un unico elemento colaminato, vincolato successivamente al telaio tramite supporti strutturali dedicati, appositamente progettati per garantire solidità e integrazione meccanica con la scocca in carbonio. Questa configurazione consente di soddisfare pienamente i requisiti regolamentari, assicurando una protezione efficace contro urti frontali, laterali e posteriori, e allo stesso tempo conferisce rigidità all'intero sistema.

Dal punto di vista del layout, l'intero modulo bombole è stato posizionato il più possibile verso la parte anteriore del veicolo, all'interno della zona centrale del telaio. Questa scelta ha permesso di liberare spazio nella porzione posteriore, destinata all'alloggiamento dei radiatori, e ha contribuito a mantenere un bilanciamento ottimale delle masse lungo l'asse longitudinale. Tale disposizione, oltre a favorire il comportamento dinamico in fase di guida, ha anche reso più efficiente l'organizzazione complessiva del vano posteriore, migliorando l'integrazione dei componenti ausiliari.

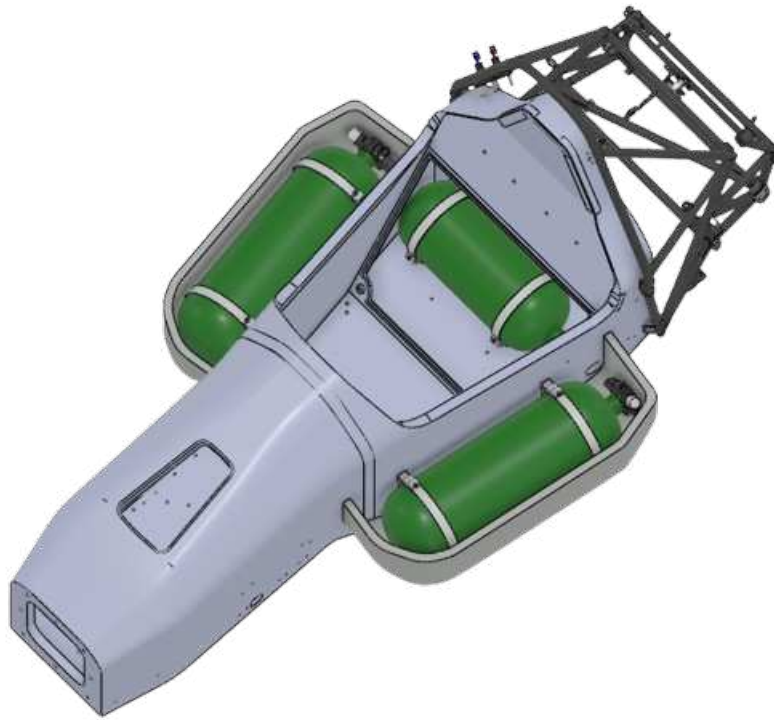


Figura 3.14: Monoscocca e sidepods strutturali

3.7 Posizionamento dei radiatori e delle carene

Con l'introduzione delle sidepods strutturali per l'alloggiamento delle bombole di idrogeno, è stato necessario ripensare il posizionamento del sistema di raffreddamento del veicolo. Nella configurazione precedente, i radiatori erano collocati all'interno delle pance aerodinamiche, ma con la nuova architettura tali volumi sono stati occupati da strutture composite ad alta resistenza, vincolate al telaio per proteggere il sistema a idrogeno.

Per questo motivo, i radiatori sono stati riposizionati verso la parte posteriore della vettura, immediatamente dietro le nuove sidepods, questa soluzione consente di mantenere un'efficace esposizione al flusso d'aria.

Il nuovo posizionamento permette inoltre una semplificazione del percorso dei tubi di raffreddamento, riducendo le perdite di carico e migliorando l'efficienza complessiva dello scambio termico dovuta alla maggiore vicinanza dei radiatori al motore stesso. La scelta è stata guidata anche dalla volontà di preservare il bilanciamento delle masse e ottimizzare il packaging del veicolo

senza compromettere le prestazioni dinamiche o la sicurezza del sistema idrogeno.

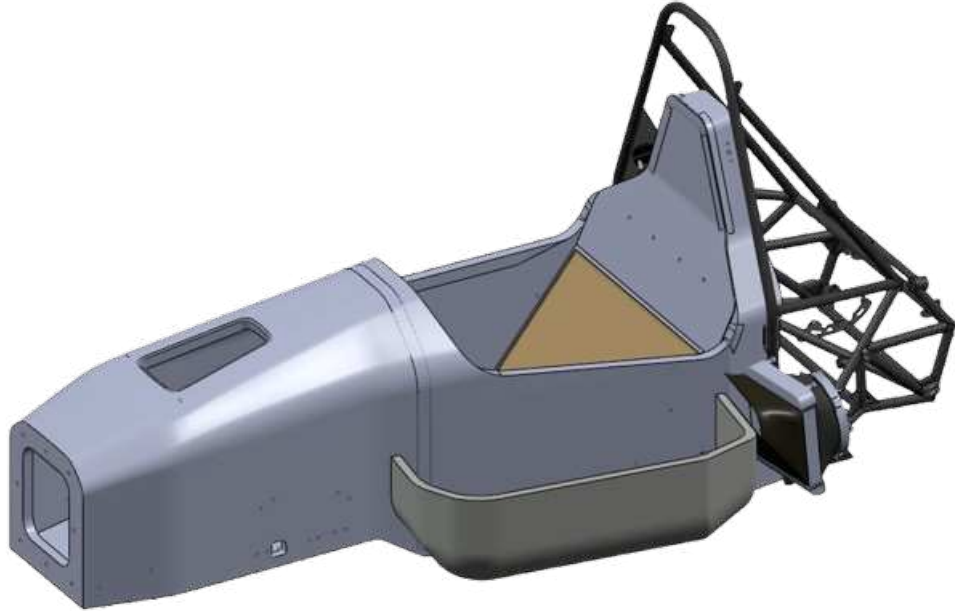


Figura 3.15: Monoscocca e radiatori

Le carene laterali del veicolo a idrogeno sono state progettate con l'obiettivo di garantire la copertura del radiatore e di contribuire al mantenimento dell'efficienza aerodinamica del veicolo. Questi elementi si estendono lungo i fianchi della vettura, avvolgendo il pacco radiante posizionato dietro le sidepods strutturali e guidando il flusso d'aria in modo efficace attraverso il sistema di raffreddamento. La sua geometria segue il profilo della struttura laterale, integrandosi in modo fluido con il corpo vettura per minimizzare le discontinuità superficiali e ottimizzare il flusso d'aria lungo la fiancata. In questo modo, la carena contribuisce a mantenere l'efficienza aerodinamica complessiva del veicolo, pur assolvendo una funzione prettamente di rivestimento e canalizzazione del flusso verso il pacco radiante.

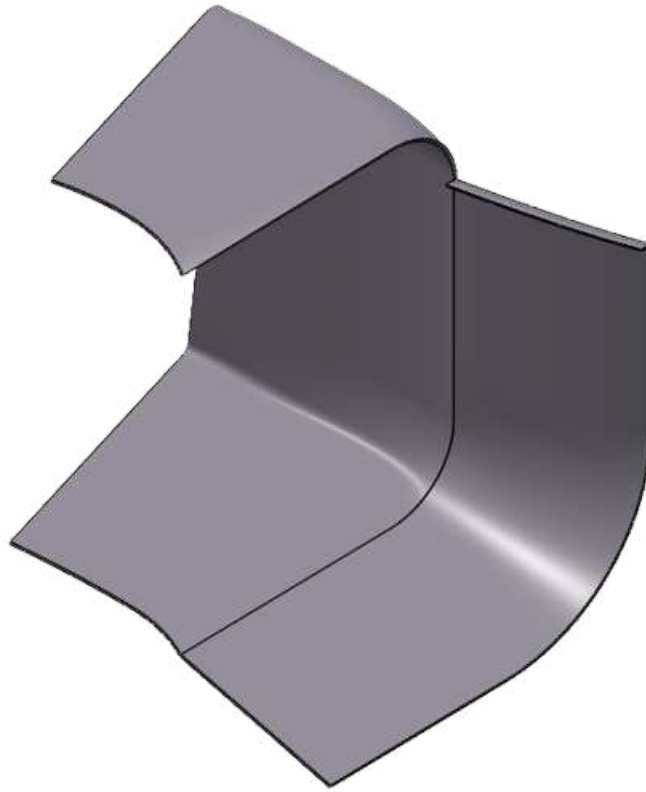


Figura 3.16: Carene

La separazione tra il sistema di accumulo dell'idrogeno e il pilota è garantita da un elemento specifico realizzato in materiale composito che deve avere le stesse caratteristiche del firewall. Questo componente, agganciato alla struttura laterale, è smontabile e progettato per assicurare la protezione passiva del pilota sia durante la guida sia nelle fasi di salita e discesa dall'abitacolo, come richiesto dal regolamento tecnico della classe Hydrogen. Al contempo, la sua configurazione consente la rapida rimozione della bombola per le operazioni di sostituzione o manutenzione.

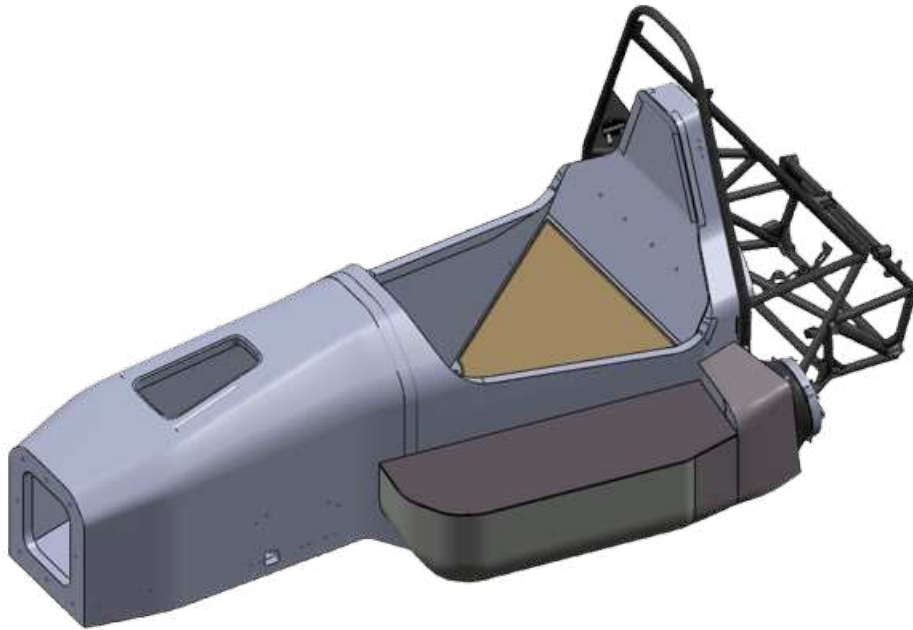


Figura 3.17: Assieme sidepods strutturali completo

3.8 Componenti della linea carburante

L'integrazione della linea carburante rappresenta un elemento fondamentale per garantire la corretta alimentazione del motore a idrogeno, nel rispetto dei criteri di sicurezza, efficienza e affidabilità richiesti dalla competizione.

Il sistema è composto da diversi sottosistemi, ciascuno con una funzione specifica. Il primo elemento della catena è costituito dai dispositivi OTD (On Tank Devices), montati direttamente sulle bombole. Questi componenti svolgono una funzione cruciale, poiché integrano al loro interno valvole di chiusura, regolatori di pressione, sensori e dispositivi di sicurezza passiva, consentendo un controllo immediato e sicuro del flusso di idrogeno in uscita da ciascun serbatoio.

Dalle bombole, il gas viene convogliato attraverso una rete composta da tubi flessibili e rigidi, realizzati in materiali compatibili con l'idrogeno e certificati per l'alta pressione. In particolare, i tubi flessibili vengono utilizzati nei tratti che richiedono libertà di movimento o facilità di installazione, mentre quelli rigidi sono impiegati nei tratti più stabili per garantire maggiore robustezza e durata.

I flussi provenienti dalle tre bombole vengono quindi raccolti in un collettore, il cui compito è quello di unificare le tre linee in una sola, riducendo la complessità del sistema a valle e semplificandone la gestione. A monte e a valle del collettore sono state installate diverse valvole manuali, che permettono l'isolamento selettivo delle bombole o dell'intero circuito, utili sia in fase di test che in situazioni di emergenza.

A completamento del circuito, sono stati inseriti anche componenti di sicurezza e monitoraggio. Tra questi, spiccano i dischi di rottura (burst plates), dispositivi progettati per intervenire automaticamente in caso di sovrappressione anomala nel sistema, evitando situazioni di pericolo. Inoltre, sono stati integrati sensori di pressione, dislocati in punti chiave della linea, che consentono di monitorare in tempo reale lo stato del sistema, fornendo dati preziosi per la gestione del veicolo e per l'intervento in caso di malfunzionamenti.

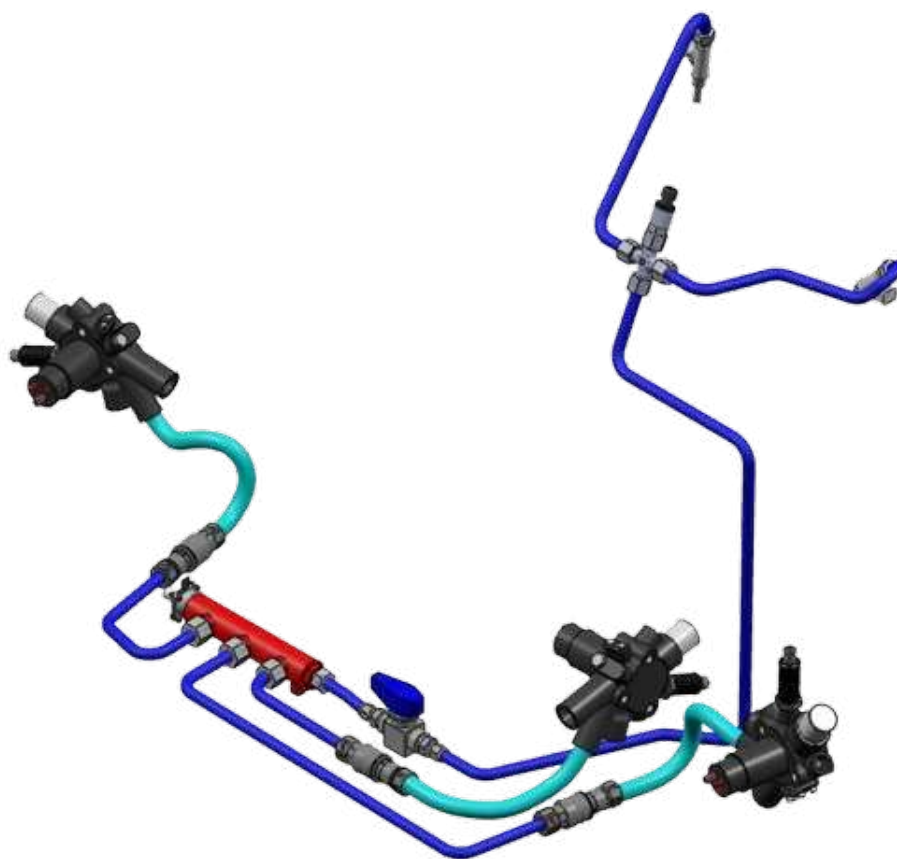


Figura 3.18: Linea carburante

3.8.1 On Tank Devices (OTD)

L'OTD (On Tank Devices) è un componente fondamentale del sistema di alimentazione a idrogeno, poiché costituisce il primo punto di controllo del gas in uscita dalla bombola. Per la vettura a idrogeno, si è scelto di utilizzare un modello avanzato e altamente integrato: Agro Anleg Advanced Technologies OTVR1-Series, un dispositivo progettato specificamente per applicazioni automotive in ambito motorsport e mobilità a idrogeno. [18]



Figura 3.19: On Tank Devices

Questo modello si distingue per la presenza di un regolatore di pressione integrato, che consente di ridurre direttamente la pressione dell'idrogeno in uscita dalla bombola, inizialmente a circa 350 bar, a un livello più gestibile per le successive sezioni del sistema, tipicamente tra 10 e 20 bar, a seconda delle esigenze del motore e della configurazione del circuito. L'integrazione del regolatore direttamente nel corpo dell'OTD consente di ridurre al minimo gli ingombri, le connessioni e le potenziali perdite, migliorando la sicurezza complessiva del sistema.

Tra le principali caratteristiche tecniche dell'OTVR1-Series figurano:

- Corpo in acciaio inox ad alta resistenza, compatibile con idrogeno ad alta pressione;
- Regolatore di pressione integrato a membrana, con taratura regolabile e alta precisione;
- Valvola manuale di apertura/chiusura per un controllo immediato del flusso;

- Valvola di non ritorno (check valve) interna per prevenire il riflusso del gas;
- Porta per sensore di pressione integrata, utile per monitorare la pressione residua della bombola;
- Sensore di temperatura integrato, indispensabile per la gestione termica e la sicurezza del sistema
- Certificazioni secondo le normative ISO 19880 e EC79, specifiche per veicoli a idrogeno;

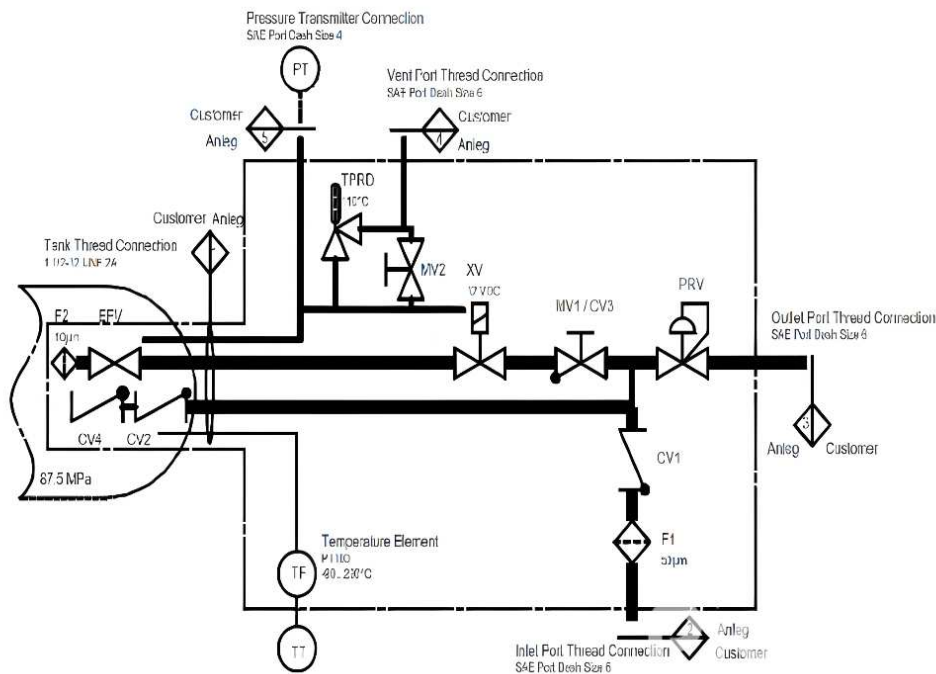


Figura 3.20: Schematico OTD

3.8.2 Connettore a sgancio rapido

Lungo la linea di alimentazione, subito a valle degli OTD e dei relativi regolatori di pressione, il regolamento della Formula Student Hydrogen prevede l'inserimento obbligatorio di connettori a sgancio rapido. Questa prescrizione nasce dall'esigenza di garantire che le bombole di idrogeno possano essere rimosse in modo semplice e sicuro dal veicolo ogni volta

che quest'ultimo non si trovi in fase di ispezione tecnica oppure all'interno dell'area dedicata alle prove dinamiche.

Per soddisfare questo requisito normativo e al contempo mantenere un'elevata efficienza operativa, sono stati installati tre connettori rapidi, uno per ciascuna bombola. Tali dispositivi consentono di scollegare e riconnettere il sistema senza l'uso di attrezzi, riducendo i tempi di intervento e minimizzando i rischi associati alla manipolazione dell'idrogeno. Per soddisfare i requisiti normativi e garantire massima affidabilità nelle operazioni di scollegamento, sono stati scelti connettori a sgancio rapido Staubli RBL Quick-Release Coupling [19], specificamente progettati per applicazioni ad alta pressione e compatibili con idrogeno.



Figura 3.21: Connettore a sgancio rapido

3.8.3 Collettore

Per unire il flusso proveniente dalle tre bombole in un'unica linea di alimentazione verso il motore, è stato impiegato un collettore in acciaio ad alta resistenza prodotto da Poppe + Potthoff [20], azienda leader nel settore dei componenti per applicazioni ad alta pressione con idrogeno.

Il collettore ha la funzione di garantire una distribuzione omogenea dell'idrogeno agli iniettori, riducendo al contempo le pulsazioni di pressione nella linea. In questo caso specifico, viene impiegato come rail di distribuzione all'interno del sistema di alimentazione per raccogliere e uniformare i flussi provenienti dalle tre bombole. Questa soluzione consente non solo di mantenere una pressione stabile a valle del sistema, ma anche di migliorare l'efficienza e la sicurezza della gestione del carburante a bordo del veicolo.

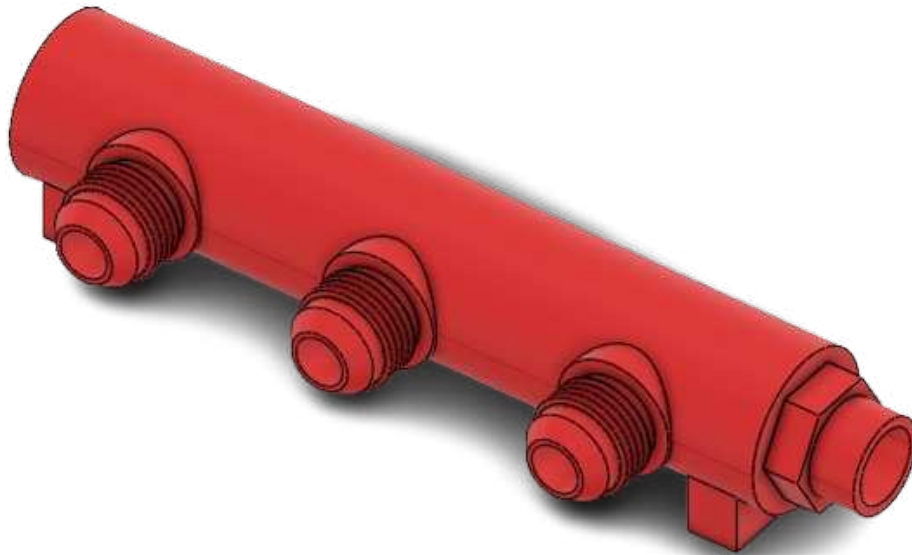


Figura 3.22: Collettore

3.8.4 Valvola manuale

Lungo la linea di alimentazione dell'idrogeno è stata inserita una valvola manuale, la cui presenza è imposta dal regolamento tecnico della Formula Student Hydrogen. Uno degli scopi principali di questa valvola è consentire la pressurizzazione controllata e graduale delle diverse sezioni del circuito, in modo da garantire la sicurezza dell'impianto durante le fasi di attivazione e manutenzione.

Oltre a questo, la valvola manuale rappresenta un elemento fondamentale per l'isolamento di porzioni specifiche della linea durante interventi tecnici, test di tenuta o situazioni d'emergenza, offrendo un ulteriore livello di controllo operativo e sicurezza.

Per la nostra applicazione è stato possibile utilizzare valvole manuali compatte e affidabili, purché conformi all'utilizzo con idrogeno. Una scelta adeguata è rappresentata, ad esempio, dai modelli proposti dalla Parker Hannifin [21], azienda specializzata in soluzioni per il controllo dei fluidi, che offre valvole realizzate con materiali compatibili con l'idrogeno e testate per applicazioni critiche in ambito automotive e industriale.



Figura 3.23: Valvola manuale

3.8.5 Tubi flessibili e rigidi

Nei sistemi di alimentazione a idrogeno, la scelta dei tubi è un aspetto critico, poiché devono garantire la massima sicurezza, compatibilità chimica e resistenza meccanica in condizioni di alta pressione. I tubi idonei per l'idrogeno possono essere suddivisi principalmente in due categorie:

- Tubi flessibili, solitamente realizzati con materiali multistrato (interno in acciaio inox o polimeri resistenti all'idrogeno e rinforzi esterni) che permettono una certa libertà di movimento e adattabilità nel layout;
- Tubi rigidi, generalmente in acciaio inossidabile (come AISI 316L), caratterizzati da un'elevata robustezza e resistenza alla permeazione dell'idrogeno, nonché da una minore probabilità di danneggiamento meccanico o invecchiamento.

Nel layout della vettura a idrogeno, si è optato per un utilizzo combinato di tubi flessibili e rigidi, sfruttando i punti di forza di ciascuna tipologia in base alle esigenze funzionali e costruttive. Dagli OTD (On-Tank Devices) fino ai connettori a sgancio rapido, sono stati installati tubi flessibili, per garantire la necessaria mobilità e flessibilità nella rimozione delle bombole. Questa scelta si è rivelata particolarmente utile considerando il posizionamento delle due bombole laterali nelle pance: in queste zone, il tubo deve infatti

attraversare le pareti laterali del monoscocca, arrivando nella la zona del firewall, per poi raggiungere i dispositivi di connessione. I tubi flessibili rendono possibile l'estrazione agevole delle bombole senza compromettere l'integrità del circuito.

Per questa sezione, sono stati scelti tubi flessibili della Semperit [22], progettati per l'uso con idrogeno e certificati per pressioni di esercizio fino a 20 bar, adatti quindi per la tratta a valle del regolatore di pressione.



Figura 3.24: Tubo flessibile per idrogeno

Per tutte le rimanenti tratte della linea carburante, dove i componenti sono fissi e non soggetti a rimozione o movimento, sono stati utilizzati tubi rigidi in acciaio inox, forniti da Poppe + Potthoff.[23]

I tubi rigidi offrono numerosi vantaggi:

- Maggiore resistenza meccanica e stabilità nel tempo;
- Ridotta permeazione dell'idrogeno, migliorando la sicurezza del sistema;
- Minore ingombro e possibilità di installazioni pulite e stabili;
- Inferiore manutenzione, poiché meno soggetti a usura rispetto ai flessibili.



Figura 3.25: Tubo rigido per idrogeno

3.8.6 Sensori di pressione

Lungo la linea di alimentazione dell'idrogeno sono stati installati due sensori di pressione, fondamentali per il monitoraggio continuo e in tempo reale del sistema. Questi dispositivi svolgono un ruolo chiave sia in termini di sicurezza che di diagnosi operativa del veicolo. Il primo è un sensore di alta pressione, integrato direttamente all'interno dell'OTD (On-Tank Devices), e ha il compito di monitorare costantemente la pressione residua all'interno delle bombole. Questa informazione è essenziale sia per tenere sotto controllo lo stato di carica del sistema, sia per attivare eventuali strategie di sicurezza in caso di perdite o pressioni anomale.

Per questa applicazione è stato scelto un sensore WIKA MH-3-HY [24], specificamente progettato per applicazioni su veicoli a idrogeno. Le sue principali caratteristiche includono:

- Compatibilità con H_2 fino a 1000 bar;
- Uscita analogica configurabile;
- Elevata resistenza alle vibrazioni e agli urti;
- Corpo compatto e sigillatura rinforzata per applicazioni automotive.



Figura 3.26: Sensore di alta pressione per idrogeno

Il secondo è un sensore di bassa pressione, posizionato a valle del regolatore, ed è utilizzato per monitorare la pressione d'iniezione dell'idrogeno, cioè quella effettiva con cui il gas raggiunge gli iniettori. Questo dato è importante sia per verificare il corretto funzionamento del regolatore sia per controllare che il sistema di iniezione operi nelle condizioni previste.

Per questa funzione è stato impiegato un sensore Danfoss DST P150 [25], noto per la sua:

- Alta precisione di lettura su basse pressioni (fino a 10-20 bar);
- Robusta costruzione in acciaio inox;
- Resistenza alle fluttuazioni termiche e vibrazionali;
- Interfaccia compatibile con sistemi di acquisizione dati veicolari.



Figura 3.27: Sensore di bassa pressione per idrogeno

3.8.7 Dischi di rottura

I dischi di rottura per sovrappressione sono componenti fondamentali per la sicurezza passiva del sistema di alimentazione a idrogeno, e la loro presenza è obbligatoria secondo il regolamento tecnico della categoria Hydrogen. Il regolamento richiede infatti l'integrazione di dispositivi meccanici non riattivabili in grado di aprirsi in modo irreversibile in caso di sovrappressione, proteggendo così l'intero impianto da scenari critici dovuti a guasti del regolatore o ad anomalie di funzionamento.

Nel nostro layout, i dischi di rottura sono integrati direttamente nel collettore fornito da Poppe + Pothoff, precedentemente descritto. Questa configurazione permette di proteggere simultaneamente l'intero sistema a valle del collettore, dove il flusso dell'idrogeno proveniente dalle tre bombole viene unificato.

Come richiesto dal regolamento, tali dischi sono accoppiati a un interruttore elettrico di tipo N/C (normalmente chiuso) che permette di monitorare costantemente lo stato del disco. In caso di intervento e conseguente rottura del disco, l'interruttore si apre, generando un segnale elettrico che viene inviato al sistema SDC (Shutdown Circuit) del veicolo. Questo sistema ha il compito di interrompere l'alimentazione elettrica e disattivare la linea carburante a idrogeno, contribuendo a mettere in sicurezza l'intero veicolo in tempi estremamente rapidi.

Per la vettura a idrogeno sono stati scelti dischi di rottura con sensore di allarme integrato, che garantiscono un elevato livello di affidabilità e reattività in caso di emergenza. Questo approccio risponde pienamente alle normative di sicurezza e migliora la gestione del rischio in caso di sovrappressione. L'immagine seguente è inserita a solo scopo illustrativo e non rappresenta necessariamente il layout definitivo o i componenti effettivamente utilizzati.



Figura 3.28: Disco di rottura

3.9 Descrizione del layout completo

Il layout complessivo della vettura a idrogeno nasce dall'evoluzione della precedente configurazione ibrida, mantenendo la base strutturale del monoscocca in carbonio e del telaio posteriore in acciaio, ma integrando un nuovo sistema di alimentazione a idrogeno. L'obiettivo è stato quello di adattare la piattaforma esistente ai nuovi vincoli tecnici, regolamentari e funzionali, preservando al contempo le prestazioni dinamiche e la sicurezza.

Le due bombole principali da 20 litri sono state posizionate all'interno di sidepods strutturali laterali colaminati al telaio, mentre una terza bombola da 10 litri trova posto sotto il firewall. Il sistema di raffreddamento è stato spostato nella zona posteriore. A protezione dei radiatori e delle bombole, sono state progettate carene aerodinamiche con funzione strutturale, come richiesto dal regolamento.

L'intera linea carburante, dai dispositivi OTD fino al collettore e agli iniettori, è stata progettata con particolare attenzione alla sicurezza e

all'affidabilità, includendo sensori, valvole, dischi di rottura e un SDC aggiornato per la gestione di tutti i componenti dell'impianto a idrogeno. La configurazione finale garantisce un equilibrio ottimale tra ingombri, peso e integrazione funzionale. Le immagini seguenti mostrano la disposizione dei componenti principali all'interno del veicolo.

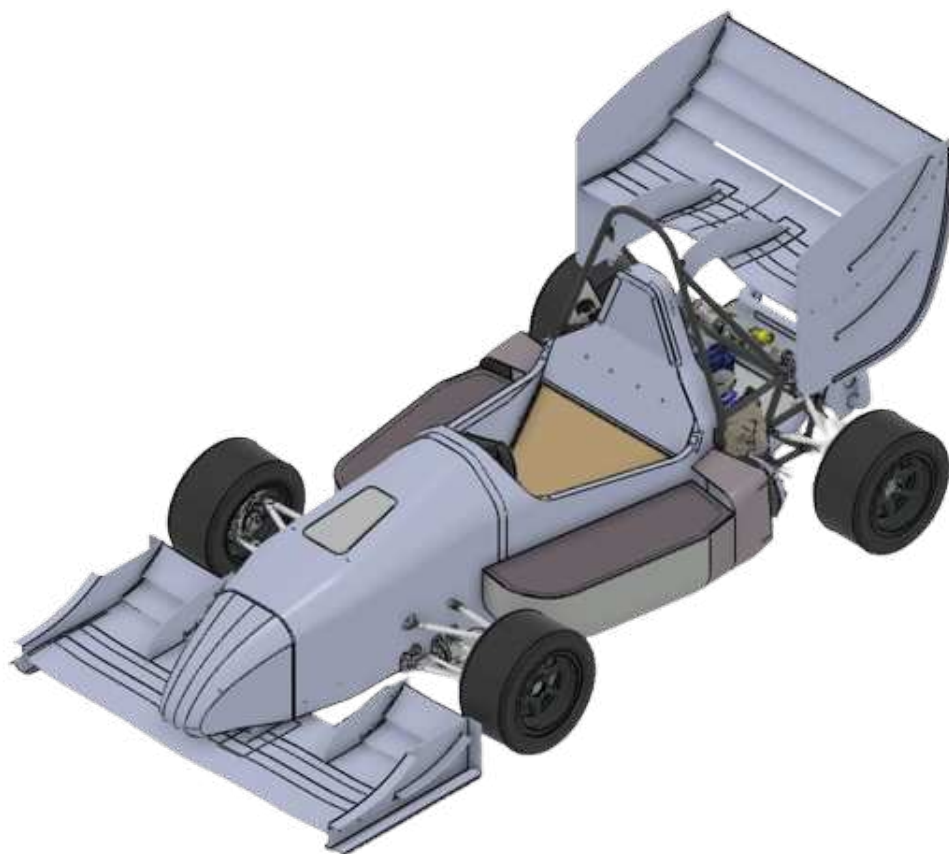


Figura 3.29: Vettura a idrogeno in vista isometrica

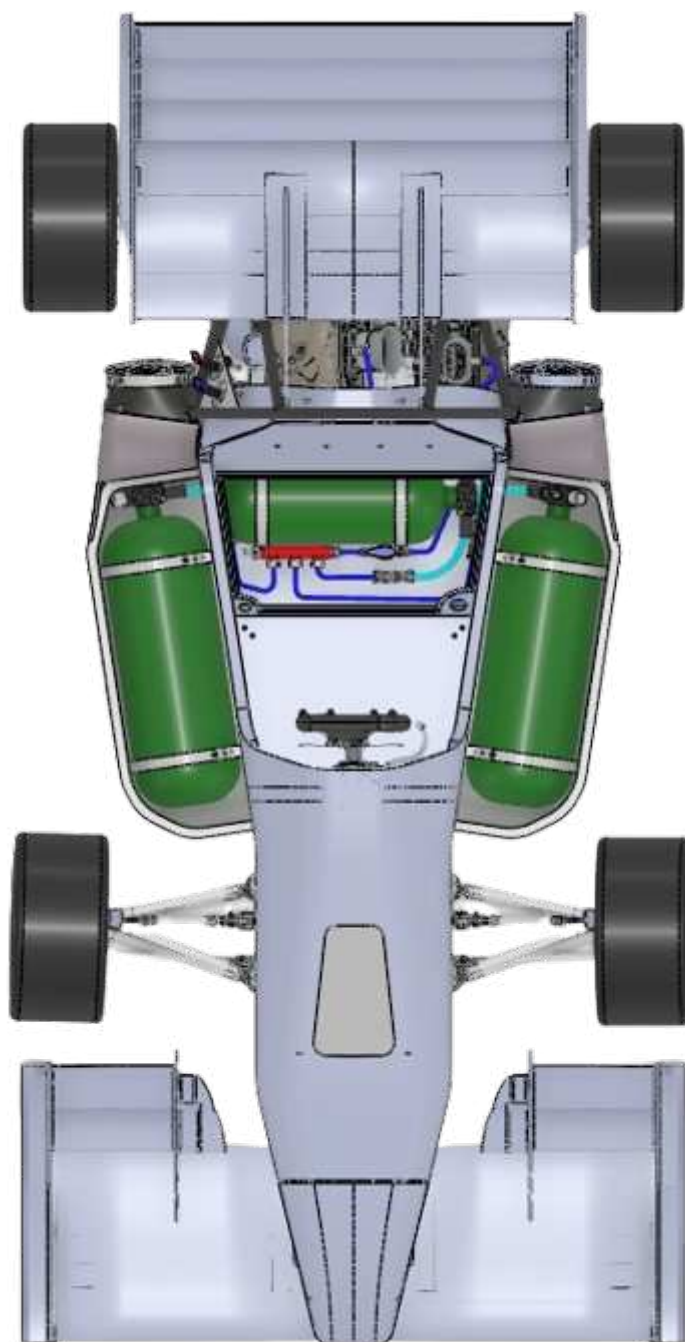


Figura 3.30: Vettura a idrogeno vista dall'alto

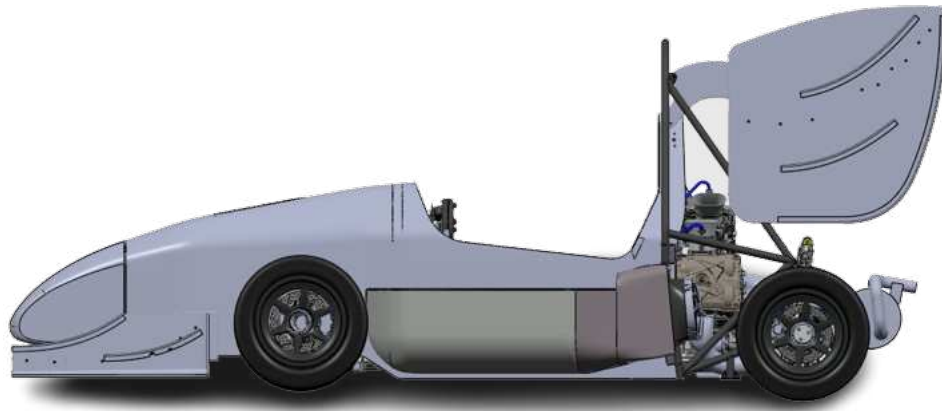


Figura 3.31: Vettura a idrogeno in vista laterale

Per quanto riguarda la vettura alimentata a idrogeno, è stata effettuata una stima complessiva del peso partendo dal valore già noto della versione ibrida, pari a circa 260 kg. A partire da questo dato, è stata redatta una lista dettagliata dei componenti rimossi, tra cui motore elettrico, batteria ad alta tensione, inverter e serbatoio carburante, stimandone accuratamente il peso totale. Successivamente, sono stati aggiunti alla stima i pesi dei nuovi componenti introdotti con il layout idrogeno: in particolare, le bombole per lo stoccaggio dell'idrogeno, le pance laterali strutturali realizzate ad hoc per contenerle, e l'insieme dei dispositivi meccanici ed elettronici che costituiscono la linea carburante a idrogeno (valvole, sensori, tubazioni, dispositivi di sicurezza, ecc.).

L'approccio ha permesso di effettuare un bilancio peso realistico e coerente con la nuova configurazione e il risultato finale mostra che anche la vettura a idrogeno presenta un peso stimato complessivo di circa 260 kg, in linea con la versione ibrida di partenza.

PESO HYBRID M23-H			260	kg
Componenti eliminati				
Batteria	23	kg		
Inverter	4.6	kg		
Motore Elettrico	12	kg		
Serbatoio	2.5	kg		
Cavi	5.5	kg		
Raffreddamento Batt	2	kg		
Radiatore	0.75	kg		
Benzina	3	kg		
Totale	53.35	kg		

PESO IDROGENO			259.15	kg
Componenti aggiunti				
Bombole 20l	14	kg		
Bombola 10l	3.5	kg		
Supporti bombole	3.5	kg		
Copertura bombole	12	kg		
OTD	3.6	kg		
Testa	8.5	kg		
Fuel line	5	kg		
Secondo scarico	1.2	kg		
Idrogeno	1.2	kg		
Totale	52.5	kg		

Figura 3.32: Tabelle dei componenti rimossi e aggiunti

3.10 Confronto delle prestazioni

Per valutare in modo oggettivo le potenzialità del nuovo layout a idrogeno rispetto alla più recente vettura a combustione sviluppata dal team, ovvero la M24-LH equipaggiata con un motore Suzuki da 708 cc alimentato a E85, è stato effettuato un confronto diretto tra le potenze termiche disponibili. Questo confronto si basa sulla quantità di energia termica potenzialmente fornita dal combustibile, calcolata come il prodotto tra la portata di carburante e il potere calorifico inferiore (PCI) del combustibile stesso (29,3 MJ/kg per l'etanolo, 120 MJ/kg per l'idrogeno). Nel caso della M24-LH, l'alimentazione a E85, pur essendo vantaggiosa in termini di raffreddamento interno e tolleranza a rapporti stechiometrici più magri, presenta un potere calorifico inferiore rispetto all'idrogeno. Tuttavia, il motore Suzuki opera con una cilindrata significativamente più bassa rispetto al Ducati 1299, che costituisce il cuore della nuova vettura a idrogeno. Utilizzando i dati di portata stimati in fase di simulazione e i rispettivi poteri calorifici, è stato possibile calcolare la potenza termica erogabile per entrambe le configurazioni.

$$Q_c = \dot{m}_{inj} \cdot K_i \quad [J] \quad (3.11)$$

Per confrontare in modo diretto il potenziale energetico tra la vettura a idrogeno e quella alimentata a E85, si è scelto di analizzare la potenza termica disponibile nei due casi. A tal fine, è stata calcolata la differenza

percentuale tra le due potenze termiche, rapportando il divario rispetto alla potenza della vettura a E85.

$$\Delta Q_c = \frac{Q_{c,H_2} - Q_{c,E85}}{Q_{c,E85}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.12)$$

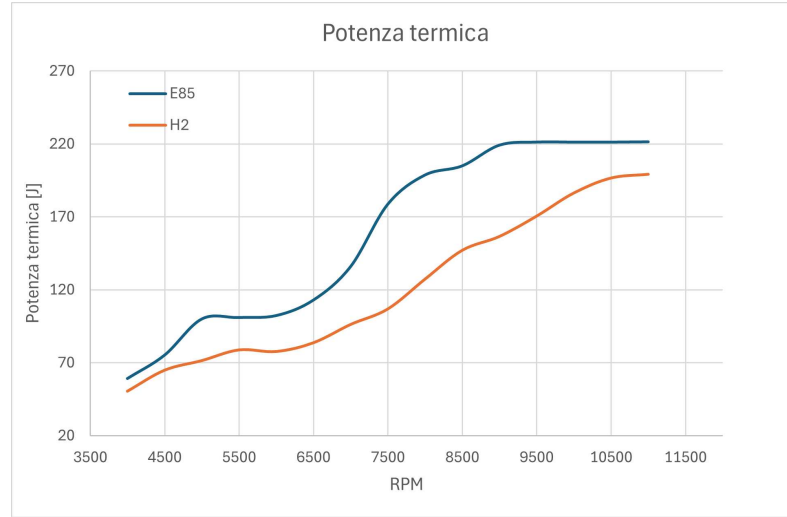


Figura 3.33: Andamento della potenza termica

Dalla figura si osserva chiaramente che il motore a idrogeno presenta una potenza termica sensibilmente inferiore rispetto al motore alimentato a E85, con scostamenti negativi che raggiungono picchi del -40% . Questa differenza è particolarmente marcata nella fascia attorno agli 7500-8000 rpm, dove l'effetto penalizzante dell'idrogeno sulla potenza termica si manifesta in modo netto. Tuttavia, salendo ulteriormente con il regime motore, la differenza tende ad attenuarsi. Questo comportamento è riconducibile principalmente al fatto che il motore Suzuki alimentato a E85 è soggetto alla restrizione imposta dal regolamento Formula Student, che limita il flusso d'aria attraverso un air restrictor. Al contrario, il Ducati 1299 nella configurazione a idrogeno non presenta alcuna strozzatura sull'aspirazione, poiché il regolamento della classe Hydrogen non la impone. Questo porta il motore a idrogeno ad avere un maggiore potenziale di aspirazione agli alti regimi, che compensa in parte la perdita di potenza dovuta al volume occupato dal gas nella miscela. Nonostante ciò, le prestazioni globali rimangono inferiori nelle condizioni di massimo carico, evidenziando i limiti intrinseci dell'alimentazione a idrogeno con iniezione nei collettori rispetto a un motore ottimizzato per E85.

3.11 Schematico SDC aggiornato

Con l'introduzione del sistema di alimentazione a idrogeno, si è reso necessario aggiornare lo schema elettrico dello SDC (Shutdown Circuit), già consolidato nelle precedenti vetture a combustione interna, per integrare nuovi componenti specifici richiesti dal regolamento e dalla natura del nuovo sistema.

Una delle principali modifiche è l'introduzione dell'HSMS (Hydrogen System Master Switch) un interruttore dedicato all'alimentazione esclusiva dei dispositivi del sistema idrogeno, quali elettrovalvole, sensori di pressione e temperatura, dischi di rottura e altri componenti installati lungo la linea carburante. L'HSMS è stato separato dal LVMS (Low Voltage Master Switch) per garantire una maggiore sicurezza operativa, impedendo l'attivazione accidentale del sistema idrogeno quando non desiderata, come ad esempio durante le fasi di manutenzione o trasporto. Lungo la linea carburante sono presenti diversi sensori di monitoraggio, tra cui sensori di pressione e temperatura delle bombole, integrati negli OTD, e sensori di bassa pressione, posti a valle del regolatore, che misurano la pressione di iniezione. Secondo regolamento, segnali come overpressure delle bombole, sovratemperatura, e eccessiva pressione nella linea a bassa pressione devono essere interfacciati con il sistema SDC tramite un circuito analogico, in modo simile al funzionamento del BSPD (Brake System Plausibility Device) utilizzato per l'impianto frenante. Per questo scopo è stato sviluppato un nuovo modulo elettronico chiamato HSPD (Hydrogen System Plausibility Device) il quale:

- Riceve in ingresso i segnali analogici di pressione e temperatura;
- Confronta tali segnali con soglie preimpostate di sicurezza;
- In caso di superamento di tali soglie, interrompe il circuito SDC, causando l'arresto immediato del flusso di idrogeno e disattivando il motore.

Anche il disco di rottura per sovrappressione, installato sul collettore, è integrato nel circuito SDC. Questo è dotato di un interruttore N/C (normalmente chiuso), che in caso di rottura segnala l'evento al sistema di sicurezza e interrompe la SDC. La SDC deve soddisfare anche i seguenti requisiti:

- Tutti i circuiti facenti parte dello SDC devono essere progettati in modo tale che, nello stato diseccitato o scollegato, interrompano il circuito, garantendo così una condizione di sicurezza passiva.

- In caso di attivazione dello SDC, non deve più fluire idrogeno dalle bombole verso il tratto a bassa pressione del sistema di alimentazione. Questo è garantito dalla configurazione dell'OTV (On Tank Valve) che deve essere normalmente chiusa (N/C).
- L'attivazione dello SDC deve comportare l'arresto immediato del motore, tramite la disattivazione dell'accensione e il blocco dell'iniezione.
- Lo SDC deve controllare l'alimentazione elettrica di tutto il sistema di iniezione, accensione e delle valvole OTV, tramite almeno due relè meccanici uno dedicato alle valvole OTV (che chiudono l'alimentazione di idrogeno), l'altro dedicato al controllo degli iniettori e dell'accensione del motore.

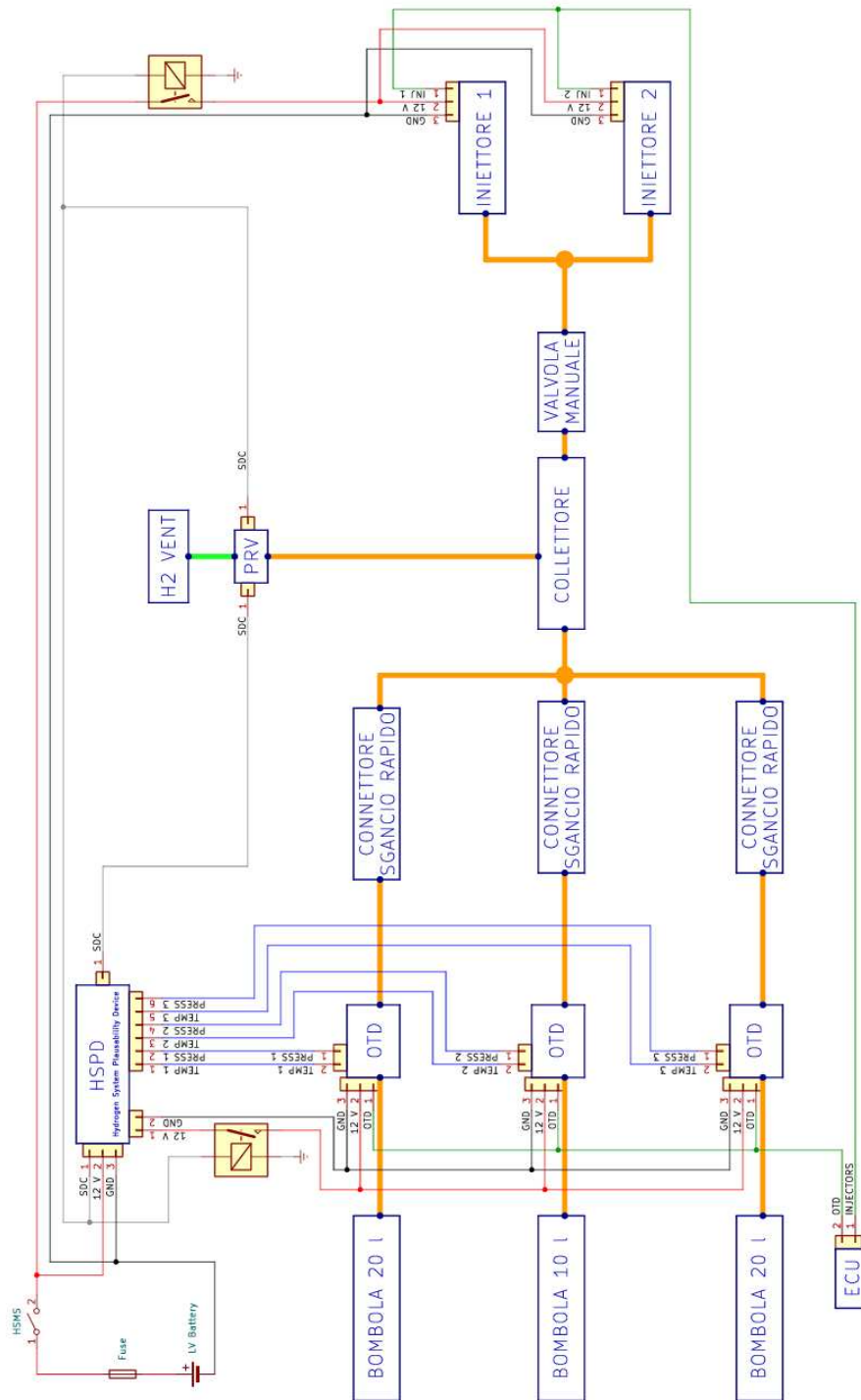


Figura 3.34: Shutdown circuit dei componenti idrogeno

Capitolo 4

Possibili sviluppi futuri

Il layout attuale della vettura alimentata a idrogeno rappresenta una soluzione solida e funzionante, ma vi sono ancora ampi margini di miglioramento che potrebbero essere esplorati in futuro per aumentare l'efficienza complessiva e le prestazioni. Una delle prime direzioni possibili riguarda lo studio e la fattibilità dell'iniezione diretta dell'idrogeno. Attualmente, l'idrogeno viene iniettato nei collettori di aspirazione, ma questo comporta una penalizzazione in termini di efficienza volumetrica, poiché il gas tende a spiazzare l'aria disponibile per la combustione. Utilizzando un sistema di iniezione diretta, l'idrogeno verrebbe immesso direttamente in camera di combustione, permettendo così di sfruttare al massimo il riempimento del cilindro con aria e migliorando potenzialmente la potenza e il rendimento termodinamico.

Durante le analisi è emersa la possibilità di implementare fisicamente l'iniezione diretta sulla testata Ducati 1299, sfruttando una porzione di materiale tra i due canali dell'acqua per praticare un foro che consenta l'installazione dell'iniettore. A supporto di questa ipotesi, è stato identificato un componente commerciale già esistente e pensato appositamente per l'idrogeno: l'iniettore PHINIA modello DI-CHG15 [26]. Questo componente è in grado di operare a una pressione nominale di 40 bar, con una portata fino a circa 15 g/s, rispondendo ai requisiti tipici delle applicazioni ad alta pressione per iniezione diretta. Tuttavia, questa soluzione introduce una serie di complessità aggiuntive. La linea carburante dovrebbe includere un sistema di compressione che garantisca i 40 bar necessari in prossimità dell'iniettore, con un conseguente aumento della complessità del layout, dei costi e dei requisiti di sicurezza. Inoltre, un motore in grado di aspirare una massa maggiore d'aria rischierebbe di consumare più idrogeno, portando alla necessità di strategie di combustione ancora più magre per completare

la distanza regolamentare di 22 km, tenendo come capacità massima dei serbatoi sempre 1.2 kg di idrogeno. Questo compromesso comporterebbe una riduzione della potenza utile e potrebbe vanificare in parte i vantaggi introdotti dall'iniezione diretta. Per questi motivi, sarebbe opportuno condurre uno studio approfondito sui benefici e sugli svantaggi di tale soluzione, valutandone attentamente l'impatto sia sul piano prestazionale che su quello dell'autonomia.

Un altro possibile sviluppo futuro riguarda l'aggiornamento del modello di simulazione GT-POWER. Attualmente il modello si basa sul funzionamento a benzina del motore Ducati, modificato per rappresentare il comportamento a idrogeno, ma non è ancora un modello dedicato. Un'evoluzione utile potrebbe essere la costruzione di un modello GT-POWER sviluppato specificamente per il funzionamento a idrogeno, in grado di simulare in modo più accurato la dinamica termofluidodinamica tipica di questo combustibile, considerando le peculiarità della combustione, i diversi rapporti stechiometrici, la velocità di fiamma, la formazione degli NO_x e altri parametri specifici. Un modello di questo tipo permetterebbe di ottenere stime di consumo più affidabili e di sperimentare strategie di controllo avanzate.

Un ulteriore ambito di sviluppo riguarda l'ottimizzazione della strategia di funzionamento del motore, in particolare attraverso lo studio di mappe che permettano di adattare dinamicamente i parametri di iniezione e accensione in funzione delle condizioni di carico e della richiesta di potenza. Attualmente, la strategia adottata è stata pensata per garantire l'affidabilità del sistema e il completamento della prova di Endurance, mantenendo il motore in condizioni conservative e a λ costante. Tuttavia, esiste un potenziale miglioramento nel calibrare una gestione più flessibile della miscela aria-idrogeno, valutando la possibilità di operare con λ variabile in funzione delle necessità del tracciato. Ad esempio, si potrebbero adottare miscele più ricche nei tratti dove è richiesta maggiore potenza e strategie più magre nei tratti a basso carico, al fine di migliorare il rendimento globale e ottimizzare i consumi. Questo approccio richiederebbe uno studio approfondito del compromesso tra prestazione, efficienza e formazione di NO_x , ma rappresenterebbe un passo importante verso una gestione termodinamicamente più evoluta del propulsore.

Infine, sarà necessario validare il sistema di raffreddamento nella configurazione attuale. La disposizione dei radiatori è stata modificata per far spazio alle bombole laterali e alle strutture di supporto, e quindi è opportuno verificare che l'aria raggiunga i radiatori con sufficiente portata e che non si generino zone di ristagno o surriscaldamento, soprattutto durante le prove più impegnative come l'Endurance. Sarà utile eseguire simulazioni

termiche e test in condizioni reali per determinare se l'attuale configurazione risulta adeguata o se sarà necessario intervenire sul dimensionamento delle prese d'aria, sulla geometria delle canalizzazioni o sul posizionamento degli scambiatori termici.

Capitolo 5

Conclusione

La progettazione preliminare del layout a idrogeno della vettura MMR rappresenta un passo fondamentale nell'evoluzione tecnologica del team verso soluzioni di mobilità più sostenibili, con un occhio attento all'innovazione applicata al motorsport. Questo studio ha permesso di affrontare con approccio ingegneristico e sistemico le sfide poste dall'integrazione di un sistema a idrogeno all'interno di un telaio originariamente concepito per una power unit ibrida, affrontando con successo aspetti legati a packaging, sicurezza, regolamento e gestione energetica.

Attraverso un'accurata analisi dei componenti necessari, dalle bombole ai dispositivi di regolazione, dalla linea carburante alla gestione del sistema tramite SDC, è stato definito un layout funzionale, sicuro e conforme al regolamento Formula SAE Hydrogen. L'equilibrio complessivo del veicolo è stato mantenuto, riuscendo a contenere il peso complessivo entro valori simili alla precedente configurazione ibrida. Questo risultato dimostra che la conversione a un powertrain a idrogeno non comporta penalizzazioni critiche né in termini di massa né di distribuzione dei pesi, aprendo la strada a un possibile utilizzo competitivo della tecnologia.

Un punto chiave affrontato è stato quello relativo alla stima dell'autonomia del veicolo e alla conseguente definizione della capacità necessaria del sistema di accumulo. Lo studio dei consumi attraverso simulazioni approfondite ha permesso di individuare una configurazione che garantisse il completamento della prova di Endurance nel rispetto delle limitazioni di peso e ingombro imposte dal regolamento. Questo passaggio ha confermato l'efficacia del metodo progettuale adottato e la fattibilità complessiva del sistema.

La partecipazione con una vettura a idrogeno in un contesto come la Formula SAE rappresenta inoltre un'opportunità unica per validare in pista

soluzioni tecniche innovative, offrendo una piattaforma reale di test per il futuro della propulsione sostenibile. In un momento storico in cui le richieste ambientali e le direttive normative diventano sempre più stringenti, questo tipo di sviluppo assume anche un forte valore simbolico e tecnico per la formazione dei futuri ingegneri.

In sintesi, lo sviluppo del layout preliminare ha dimostrato non solo la fattibilità tecnica di una vettura a idrogeno, ma anche la sua rilevanza all'interno di un percorso formativo e sperimentale volto alla transizione energetica. Le basi gettate con questo progetto rappresentano il punto di partenza per successive ottimizzazioni e approfondimenti, con l'obiettivo di raggiungere una piena maturità del sistema e massimizzare il potenziale competitivo del powertrain a idrogeno.

Bibliografia

- [1] Formula SAE. *Formula SAE Rules*. 2025.
- [2] MORE Modena Racing. *MMR History*. 2024. URL: <https://www.moremodenaracing.it/it/>.
- [3] Valerio Mangeruga. *An innovative hybrid power unit architecture for small vehicle application: design, analysis, manufacturing and testing*. 2016.
- [4] Formula SAE. *Hydrogen Rules*. 2025.
- [5] Chandima Gomes Kaveh Mazloomi. *Hydrogen as an energy carrier:Prospects and challenges*. 2012.
- [6] Thomas Wallner Sebastian Verhelst. *Hydrogen-fueled internal combustion engines*. 2009.
- [7] Andrew P. Wandel Khalid Saleh. *Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions*. 2023.
- [8] Alessandro D'Adamo Stefano Fontanesi. *Dispense del corso di Simulazione Fluidodinamica dei Sistemi Propulsivi*. 2024.
- [9] Hüseyin KÖSE Murat CİNİVİZ. *Hydrogen use in internal combustion engine*. 2011.
- [10] Ajenifuja E Abe JO Popoola API. *Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation*. 2019.
- [11] Oliver Kircher Klaas Kunze. *Immagazzinamento di idrogeno criocompresso, presentazione del BMW Group*. 2012.

-
- [12] Samir Borriello. *Analisi dei processi produttivi di serbatoi in composito per lo stoccaggio di idrogeno gassoso ad alta pressione e sviluppo di un modello agli elementi finiti per la previsione della pressione di scoppio*. 2019.
- [13] Ducati. *Brochure Panigale 1299*. 2014.
- [14] Clelia Cocchiara. *Studio di fattibilità di conversione a idrogeno di una vettura da competizione per applicazione Formula SAE*. 2024.
- [15] John B.LHeywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, 1988.
- [16] Riccardo Secchi. *Sviluppo di un piano cottura per uso domestico alimentabile ad Idrogeno e commercializzabile in ambito Europeo*. 2013.
- [17] Spectronik. *Carbon Fiber Cylinder Type III*. URL: <https://spectronik.com/carbon-fiber-cylinder>.
- [18] Agro Anleg Advanced Technologies. *OTVR1-Series*. URL: <https://hyfindr.com/en/shop/products/tank-valve-otvr1-series>.
- [19] Stäubli. *RBL quick-release coupling*. URL: <https://www.staubli.com/content/dam/fcs/brochures/products/rbl/rbl-all-fluids-stainless-steel-couplings-staubli-en.pdf>.
- [20] Poppe + Potthoff. *TOPAQ Parallel Charging Unit (PCU)*. URL: https://www.poppe-potthoff.com/wp-content/uploads/2025/03/PD-0016_002Product-datasheetPCU-1.pdf.
- [21] Parker. *Valvole a sfera*. URL: <https://ph.parker.com/it/it/series/ball-valves>.
- [22] Semperit. *Tubi GAC*. URL: <https://www.directindustry.it/prod/semperfex/product-61751-636350.html>.
- [23] Poppe + Potthoff. *H2 PIPES*. URL: https://www.poppe-potthoff.com/wp-content/uploads/2025/04/PD-0004_008_Product_data_sheet_H2_Lines_PPH2.pdf.

-
- [24] WIKA. *Sensore di pressione OEM modello MH-3-HY*. URL: https://www.wika.com/media/Data-sheets/Pressure/Pressure-sensors/ds_pe8159_it_it.pdf.
- [25] Danfoss. *Sensore di pressione DST P150*. URL: <https://assets.danfoss.com/documents/375798/AD470961031988en-000203.pdf>.
- [26] Phinia. *Hydrogen fuel injector (DI-CHG)*. URL: https://www.phinia.com/docs/phinalibraries/marketing-materials-hydrogen-solutions/phinia-hydrogen-fuel-injector-di-chg.pdf?sfvrsn=4fae30e0_7.