



Università di Foggia

Scienze Agrarie, Alimenti,
Risorse Naturali e Ingegneria

**Specifica Tecnica per lo Sviluppo di un Prototipo per
l'Analisi della Combustione di Carburanti Alternativi a
Zero Emissioni di Carbonio**

Direttore del laboratorio:

Prof. Francesco Fornarelli francesco.fornarelli@unifg.it



Descrizione del Prototipo

Il prototipo consiste in una Camera di Combustione a Volume Costante (CVCC) progettata per misurare la velocità di propagazione della fiamma laminare di carburanti a basso o nullo contenuto di carbonio e delle loro miscele. I carburanti principali da analizzare includono idrogeno, ammoniaca e le loro combinazioni.

Le condizioni iniziali della miscela aria/carburante devono essere completamente controllabili e regolabili. Il sistema dovrà garantire misurazioni affidabili con elevata frequenza di acquisizione, compatibile con la dinamica dei fenomeni oggetto di studio.

Le misurazioni comprenderanno:

- Parametri fisici della miscela: temperatura e pressione, sia nella fase incombusta, durante la combustione, che a valle del processo.
- Acquisizione visiva della posizione del fronte di fiamma tramite sistemi di imaging ad alta velocità, per tutti i tipi di carburante considerati.

Questo prototipo costituirà uno strumento avanzato per lo studio del comportamento in combustione dei carburanti innovativi, contribuendo allo sviluppo di tecnologie a ridotto impatto ambientale.

Dettagli della Fornitura

Prototipo per l'Analisi della Combustione di Carburanti Alternativi a Zero Carbonio

1. Descrizione Generale

Il fornitore dovrà sviluppare una Camera di Combustione a Volume Costante (CVCC) di forma sferica destinata allo studio della combustione di miscele di idrogeno, ammoniaca e delle loro combinazioni. Il sistema dovrà consentire la misurazione della velocità di fiamma laminare, con acquisizione dati dei parametri fisici della miscela, nonché imaging ad alta velocità del fronte di fiamma.

2. Requisiti Tecnici

2.1. Camera di Combustione

- Struttura: acciaio inossidabile ad alta resistenza, idoneo a funzionare in condizioni di alta pressione e alta temperatura, tenendo conto della presenza di ammoniaca.
- Diametro interno: 400 mm.



- Forma: sferica.
- Volume: dimensionato per consentire l'espansione della fiamma senza interazione con le pareti della camera.
- Intervallo di pressione iniziale della miscela: fino a 10 bar per la miscela incombusta.
- Intervallo di temperatura iniziale della miscela: fino a 400°C per la miscela incombusta. I materiali devono essere compatibili con la presenza di ammoniaca ad alte temperature.
- Accesso ottico: finestre in quarzo o materiali equivalenti resistenti alle condizioni operative. Sono richieste quattro porte ottiche disposte diametralmente, con un diametro minimo della finestra di 120 mm.

2.2 Controllo della Miscela Aria/Carburante

2.2.1 Sistema di Dosaggio e Miscelazione

Configurazione:

- Sistema di miscelazione con valvole proporzionali controllate elettronicamente per garantire una composizione precisa della miscela.
- Capacità di regolare i rapporti volumetrici dei gas (idrogeno, ammoniaca e aria) con una tolleranza inferiore a $\pm 1\%$.
- Miscelatore statico o dinamico per garantire un'adeguata omogeneizzazione prima dell'ingresso nella camera di combustione.

Componenti principali:

- Misuratori di portata massica Coriolis (MFC):
 - Intervallo di portata:
 - Idrogeno: 0 - 5 SLPM
 - Ammoniaca: 0 - 5 SLPM
 - Metano: 0 - 5 SLPM
 - Aria: 0 - 10 SLPM
 - Precisione: $\pm 0,5\%$ del fondo scala
 - Risoluzione: 0,1% del valore impostato
- Miscelatore di sicurezza dotato di valvole di non ritorno per prevenire reflussi accidentali tra i gas.

2.2.2 Sensori per Misurazione e Regolazione della Miscela

Sensori di pressione:

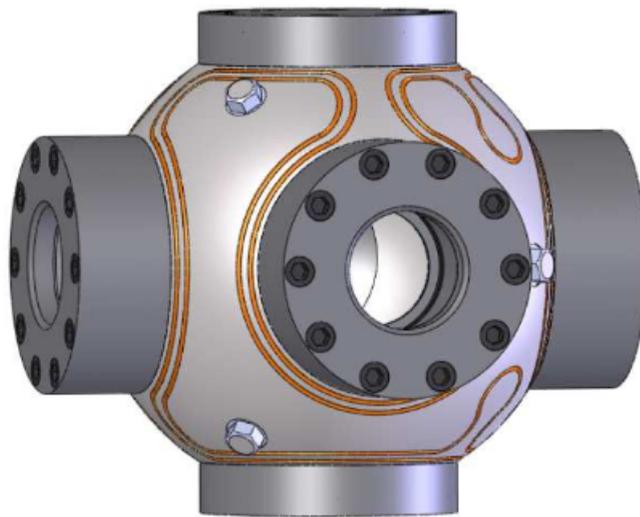
- Campo di misura: 0 - 100 bar



- Precisione: $\pm 0,25\%$ del fondo scala
- Trasduttori con uscita 4 - 20 mA o digitale (Modbus, Profibus) per integrazione con il sistema di controllo
- Monitoraggio e salvataggio delle curve di pressione in camera per ogni test

Regolazione della temperatura:

- Fasce riscaldanti esterne installate sul contenitore della bomba di combustione e tre termocoppie di tipo K richieste in un sistema PID per regolare la temperatura fino a 500 K:
 - Fasce maggiori per riscaldare la massa principale della camera
 - Riscaldatori minori per evitare la formazione di punti freddi sulle finestre di osservazione
- Due circuiti di funzionamento separati per monitorare il sistema con precisione $\pm 1,0$ K
- Visualizzazione in tempo reale delle curve di temperatura del sistema e archiviazione dei dati per ciascun test
- Allarme di soglia per controllare la temperatura massima del contenitore
- Campo operativo: da -20°C a 500°C



• *Figure 1: Sketch of the spherical combustion vessel with heater bands.*

2.2.3 Valvole di Sicurezza e Sistema di Scarico Controllato

Valvole di sicurezza contro la sovrappressione:



- Valvole di sfogo con punti di taratura regolabili (ad esempio, sfiato controllato in atmosfera).
- Valvole di non ritorno per impedire reflussi indesiderati di gas nel sistema di alimentazione.
- Valvole di emergenza a solenoide per l'interruzione immediata dell'alimentazione gas in caso di malfunzionamento.

Sistema di scarico controllato:

- Pompa a secco a spirale installata sulla linea di evacuazione per l'estrazione dei gas combustibili dalla camera di combustione. Il meccanismo a spirale secco evita contaminazioni potenziali eliminando il rischio di migrazione di vapori d'olio nella camera evacuata.
- La velocità nominale di evacuazione deve essere sufficientemente alta per garantire un rapido ed efficace svuotamento della camera (15 m³/h).
- Scarico convogliato verso un'area sicura designata, con monitoraggio delle concentrazioni di gas combustibili per evitare pericoli di accumulo.
- Rilevatore di fughe di gas per il monitoraggio continuo e spegnimento automatico in caso di rilevamento di concentrazioni pericolose.

2.2.4 Sistemi di Alimentazione di Carburanti, Ossidanti e Gas Inerti

- Serbatoi di stoccaggio dedicati e linee di alimentazione per ammoniaca (NH₃), idrogeno (H₂), metano (CH₄) e gas inerti (azoto N₂, elio He, ossigeno O₂ o altri specificati).

2.2.5 Omogeneizzazione della Miscela

Uniformità della composizione:

- Il combustibile e il comburente devono essere introdotti indipendentemente nella camera tramite una valvola a spillo, che consenta una regolazione fine delle pressioni parziali interne con risoluzione del manometro (0,1 mbar).
- È richiesto un collettore con tubi in acciaio inox da 1/4 di pollice per la distribuzione indipendente dei gas nella camera di combustione, collegato a tutti i cilindri specificati.
- Il collettore del combustibile deve essere collegato a una fornitura di azoto per il lavaggio del sistema quando necessario.
- La miscela aria/combustibile deve essere omogenea nella camera di combustione per evitare gradienti di concentrazione e temperatura che potrebbero influenzare la propagazione della fiamma.

Distribuzione uniforme della temperatura:



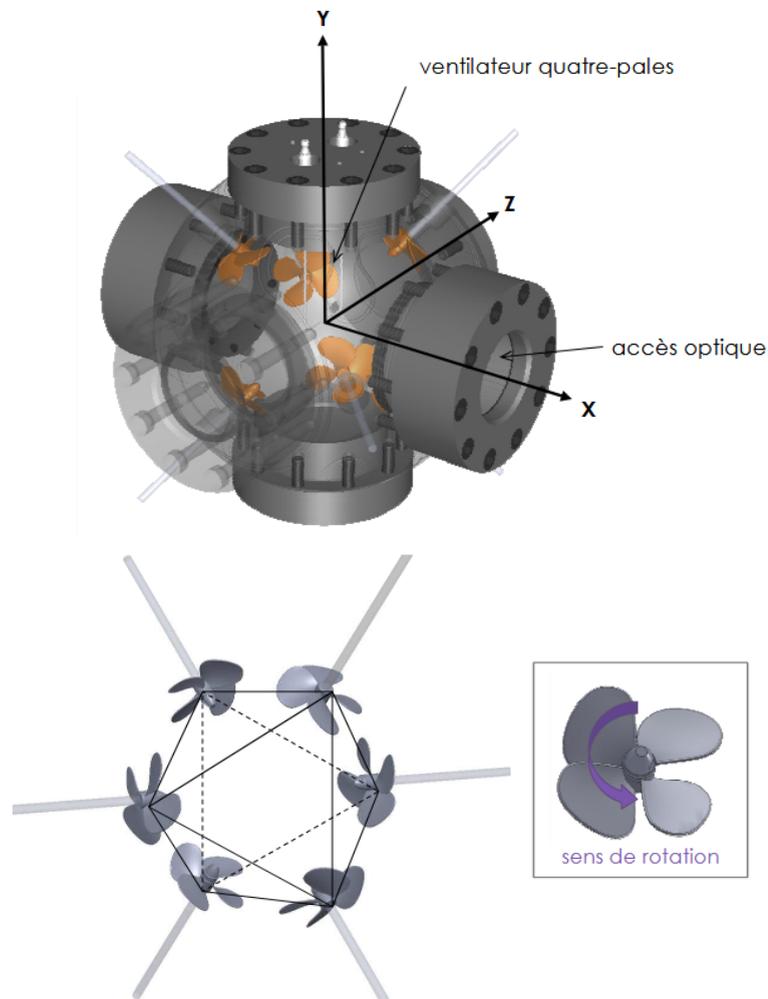
- Evita stratificazioni termiche che potrebbero influenzare il ritardo di accensione e la velocità di combustione.

Ripetibilità sperimentale migliorata:

- Garantisce dati più affidabili e riduce la dispersione nei risultati dei test.

Implementazione:

- Metodo: agitazione meccanica tramite sei ventole interne identiche posizionate vicino alla parete interna del contenitore in configurazione ottaedrica. Ogni ventola ha quattro pale che canalizzano l'aria verso il centro della sfera.
- Materiali: acciaio inossidabile adatto al funzionamento ad alta pressione e temperatura.
- Controllo: velocità di agitazione regolabile, con arresto dell'agitazione prima dell'accensione. Le ventole sono collegate direttamente a sei motori elettrici brushless dotati di controllori di velocità indipendenti. Ogni ventola può essere controllata individualmente fino a una velocità massima di 15.000 rpm.



• *Figure 2: sketch of the combustion bomb vessel with the position of the fans.*

2.2.6 Considerazioni Aggiuntive

Integrazione con il sistema di accensione:

- Il dosaggio del combustibile e l'accensione devono essere abilitati solo dopo che la camera di combustione è stata sigillata e resa operativa.

Interfaccia di controllo:

- PLC o software dedicato per la gestione in tempo reale dei parametri della miscela.
- Interfaccia grafica per il monitoraggio remoto e la regolazione.



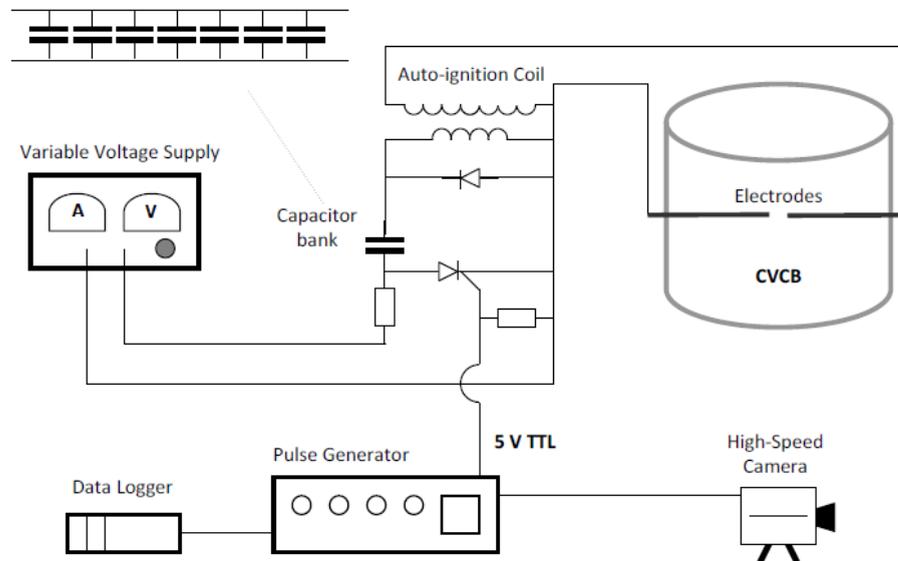
- Sistema di dosaggio e miscelazione per idrogeno, ammoniaca e aria.
- Sensori per la misurazione in tempo reale e la regolazione della portata, pressione e temperatura della miscela.
- Valvole di sicurezza e sistema di scarico controllato per garantire un funzionamento sicuro.

2.3 Sistema di Accensione

2.3.1 Accensione a Candela

Alimentazione e Controllo:

- Sistema di accensione a scarica capacitiva dotato di alimentazione a tensione variabile e bobina di accensione automatica.
- Elettrodi in tungsteno o acciaio inox. Diametro fine (1,5 mm) per ridurre l'influenza sulla propagazione della fiamma. Possibilità di variare la distanza tra gli elettrodi.
- Tensione di scarica: 35 kV.
- Energia della scintilla: > 50 mJ, per garantire l'accensione anche in miscele povere.
- Capacità di controllo della temporizzazione per ottimizzare il momento dell'accensione.
- Gli elettrodi devono essere ruotabili per il posizionamento a 0°, 45°, 90° e 135° rispetto al piano di misura del sistema Schlieren.
- Il generatore di impulsi deve essere collegato alla telecamera ad alta velocità e ai sistemi di acquisizione dati, in modo da sincronizzare video e acquisizione con l'istante di accensione.
- Distanza variabile tra gli elettrodi per fornire una scarica stabile con idrogeno e ammoniaca, che presentano caratteristiche di ionizzazione diverse rispetto agli idrocarburi convenzionali.
- Pressione operativa compatibile con la pressione massima della camera di combustione.



• *Figure 3: Schematic of the ignition system required.*

Tempo di Risposta Rapido

- Sistema di erogazione della scarica ottimizzato per minimizzare il ritardo tra l'impulso di accensione e l'avvio reale della fiamma.
- Tempo di risposta del sistema di accensione < 1 ms per garantire un avvio uniforme della combustione.
- Monitoraggio della scarica per confermare l'accensione e generare segnali di errore in caso di mancata accensione.

2.3.2 Sicurezza e Sistemi di Controllo

- Sensori di rilevamento fiamma per verificare il successo dell'accensione.
- Interruzione dell'alimentazione miscela aria-combustibile in caso di mancata accensione dopo un numero predefinito di tentativi.
- Isolamento elettrico e protezione da interferenze elettromagnetiche per prevenire disturbi al sistema di acquisizione dati.

2.4 Strumentazione di Misura

- Sensori di pressione ad alta frequenza per monitorare il processo di combustione a ≥ 40 kHz.
- Termocoppie ad alta precisione per la misurazione della temperatura della miscela.



- Sistema di acquisizione dati ad alta velocità, con frequenza compatibile con l'analisi della combustione.

2.5 Sistema di Acquisizione Immagini

2.5.1 Sistema Schlieren di tipo Z per la Visualizzazione del Fronte di Fiamma

- Configurazione: sistema Schlieren classico a doppio specchio per massimizzare la sensibilità ai gradienti di densità.
- Specchi concavi:
 - Diametro: ≥ 150 mm
 - Lunghezza focale: 1000 - 1500 mm
- Sorgente luminosa: LED bianco ad alta intensità o laser allo stato solido, preferibilmente con ottica collimata per garantire un'illuminazione uniforme.
- Diaframma con lama regolabile a micrometro per ottimizzare il contrasto dell'immagine.
- Sistema di montaggio fine per l'allineamento dell'asse ottico.

2.5.2 Telecamera ad Alta Velocità

- Risoluzione: $\geq 1024 \times 1024$ pixel per garantire una buona definizione della fiamma.
- Frequenza minima dei fotogrammi: 16.000 fps.
- Tempo di esposizione: $\leq 1 \mu\text{s}$ per evitare sfocature da movimento.
- Sensibilità: sensore con alta sensibilità (ISO 10.000 o superiore) per operare in condizioni di scarsa luminosità.
- Interfaccia di acquisizione: GigE, CoaXPress o USB 3.0 per alta velocità di trasferimento dati.
- Trigger: sincronizzazione con il sistema di accensione per catturare i momenti iniziali della propagazione della fiamma.
- Capacità di memoria fino a 128 GB.

2.5.3 Illuminazione Dedicata

- Sorgente luminosa: LED bianco ad alta potenza o laser pulsato per aumentare il contrasto nelle immagini Schlieren.
- Potenza regolabile: intensità luminosa variabile per adattarsi ai diversi test.
- Filtro ottico: per ridurre potenziali interferenze luminose e ottimizzare il contrasto dell'immagine.



3. Software e Hardware

Il software per la gestione della Camera di Combustione a Volume Costante (CVCC) deve essere altamente flessibile e modificabile, consentendo l'adattamento a nuove configurazioni sperimentali e a diversi tipi di combustibili. Deve garantire un controllo affidabile del sistema, acquisizione dati ad alta frequenza e facile integrazione con nuovi strumenti di misura o algoritmi di analisi.

3.1 Modularità e Adattabilità

- Architettura software modulare, che consente l'aggiornamento o la sostituzione dei singoli componenti senza influenzare l'intero sistema.
- Possibilità di personalizzare le sequenze di prova, con interfacce per la definizione di nuovi protocolli sperimentali.
- Supporto per script e configurazioni personalizzate, con possibilità di aggiungere moduli specifici senza riscrivere il codice principale.

3.2 Controllo e Regolazione

- Gestione flessibile delle condizioni iniziali della miscela (temperatura, pressione, composizione).
- Interfaccia configurabile per il controllo di sensori e attuatori, che consenta l'integrazione di nuovi dispositivi con una programmazione minima.
- Possibilità di calibrazione automatica o manuale per adattarsi a nuove esigenze sperimentali.

3.3 Acquisizione e Trattamento dei Dati

- Campionamento dati ad alta frequenza, con gestione di sensori multipli e possibilità di selezione delle variabili da monitorare.
- Compatibilità con diversi sistemi di imaging, per adattarsi a telecamere ad alta velocità di vari produttori e modelli.
- Analisi dati personalizzabile, con possibilità di aggiungere nuove funzioni di filtraggio, elaborazione e visualizzazione senza modificare il software principale.

3.4 Interfaccia Utente e Integrazione

- Dashboard dinamico e configurabile, che consenta la personalizzazione dell'interfaccia in base alle esigenze dell'utente.
- Compatibilità con protocolli standard (Modbus, OPC UA, TCP/IP) per l'integrazione con altri strumenti di misura e controllo.



- Funzionalità di controllo remoto, con interfaccia web o software client per accesso a distanza.

3.5 Manutenibilità ed Espandibilità

- Codice ben documentato e struttura aperta per facilitare l'espansione e la manutenzione nel tempo.
- Supporto per aggiornamenti incrementali, che consentano il miglioramento continuo delle funzionalità senza interruzioni.
- Struttura aperta per l'integrazione di algoritmi avanzati, inclusi modelli CFD o intelligenza artificiale per l'analisi della combustione.

3.6 Hardware

Il sistema hardware della Camera di Combustione a Volume Costante (CVCC) deve garantire alta precisione, affidabilità e compatibilità con il software di gestione e acquisizione dati.

3.6.1 Unità di Calcolo e Controllo

- PC industriale o workstation con CPU multi-core ad alte prestazioni, RAM adeguata e scheda grafica dedicata per l'elaborazione delle immagini.
- Sistema operativo Windows/Linux, con supporto per ambienti di sviluppo compatibili (Python, MATLAB, LabVIEW o software proprietari).
- Schede di acquisizione dati (DAQ) dedicate, con interfacce analogiche e digitali ad alta risoluzione per la gestione di sensori e attuatori.
- PLC o microcontrollori per il controllo in tempo reale, se necessario per la regolazione fine dei parametri sperimentali.

3.6.2 Interfaccia Utente

- Monitor touchscreen o interfaccia grafica dedicata per la gestione diretta del sistema in laboratorio.
- Possibilità di controllo remoto tramite interfaccia web o software client-server.
- Dashboard personalizzabile, con opzioni per la visualizzazione dei dati acquisiti, la configurazione delle prove e l'analisi in tempo reale.

3.6.3 Sistemi di Comunicazione e Connettività

- Interfaccia USB, Ethernet o Wi-Fi per il trasferimento dati e l'integrazione con altri sistemi di misura.



- Protocolli di comunicazione standard (Modbus, OPC UA, RS232, TCP/IP) per garantire la compatibilità con la strumentazione esistente e futura.

4. Requisiti di Sicurezza

- Struttura resistente a sovrappressioni accidentali.

4.1 Sistemi di Sicurezza per la Gestione delle Miscele Reattive

4.1.1 Normative di Sicurezza:

- Assicurarsi che tutti i componenti siano conformi alle normative locali e internazionali per lo stoccaggio e la manipolazione di gas pericolosi.

4.1.2 Sistemi di Rilevamento Perdite:

- Integrare sensori di rilevamento perdite per idrogeno e ammoniaca, con allarmi visivi e acustici.

4.1.3 Ventilazione Adeguata:

- Garantire che l'area di installazione sia ben ventilata per prevenire l'accumulo di gas.

4.1.4 Valvole di Sfogo e Sistemi di Arresto di Emergenza:

- Valvole di sicurezza per lo sfogo controllato.
- Sistemi di spegnimento automatico in caso di emergenza.

4.1.5 Controllo Remoto:

- Possibilità di gestione dell'operatività da remoto per aumentare la sicurezza dell'operatore.

5. Servizi Richiesti

- Progettazione e costruzione del prototipo.
- Trasporto, installazione e collaudo presso il laboratorio o impianto designato.
- Formazione del personale all'uso dell'attrezzatura.
- Manutenzione e supporto per un periodo minimo di 12 mesi.



6. Tempi di Consegna

- Progettazione: entro 1 mese dalla firma del contratto.
- Costruzione e collaudo: entro 4 mesi.
- Consegna: entro settembre 2025.
- Prove operative: entro ottobre 2025.

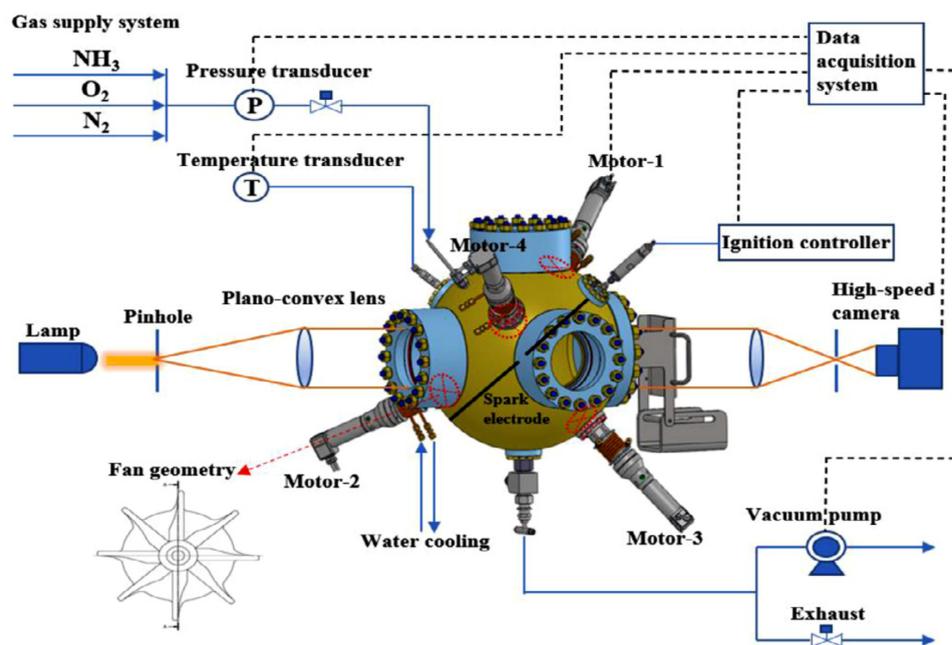


Figura 4. Esempio di configurazione di una camera di combustione a volume costante.