

Capitolo 2 Impianto di approvvigionamento del propellente: requisiti e scelte progettuali

Poichè il perossido di idrogeno è un fluido altamente ossidante e corrosivo, è stato necessario progettare un circuito di alimentazione del propellente al motore che soddisfacesse ben precisi requisiti di sicurezza ed in grado di approvvigionare il propellente garantendo il controllo della portata e della pressione di alimentazione.

In questo capitolo saranno analizzati i requisiti che l'impianto di approvvigionamento deve soddisfare e le scelte progettuali effettuate per quanto riguarda il dimensionamento di alcune grandezze fondamentali come la portata, la pressione e la capacità del serbatoio. In conclusione sarà analizzato il progetto concettuale dell'impianto di approvvigionamento.

2.1 Requisiti

I requisiti che l'impianto di approvvigionamento deve soddisfare sono di molteplice natura. L'impianto deve innanzitutto garantire l'approvvigionamento di una ben determinata portata di propellente al motore e ciò deve essere fatto rispettando tutte le principali norme tecniche di sicurezza riguardanti lo stoccaggio e la manipolazione del perossido di idrogeno ad alta concentrazione (l'acqua ossigenata a concentrazioni elevate è un fluido altamente ossidante e corrosivo). Oltre ai precedenti vi è un altro requisito da soddisfare: quello della trasportabilità.

2.1.1 Requisiti di approvvigionamento del propulsore

L'impianto di approvvigionamento nasce per alimentare due diversi propulsori a perossido d'idrogeno progettati per generare spinte rispettivamente di 5 N e 25 N. Entrambi i motori hanno dei requisiti di alimentazione ottimali che devono essere soddisfatti. In particolare i due propulsori sono stati progettati imponendo una pressione in camera di combustione di circa 10 bar. Tale imposizione ha permesso di calcolare, facendo uso della teoria monodimensionale

degli ugelli, sia la geometria degli ugelli, sia le portate necessarie a garantire i valori di spinta imposti. Una stima delle perdite all'interno del letto catalitico ha permesso di ricavare la pressione necessaria all'ingresso del motore e da questa, risalendo a ritroso le linee di alimentazione e conteggiando le perdite di pressione introdotte dai vari componenti, la pressione di pressurizzazione del serbatoio principale. La seguente tabella mostra le specifiche di progetto dei due propulsori, il dimensionamento dei medesimi e i valori di portata necessari al corretto funzionamento nel caso di utilizzo di perossido al 70% e di perossido all'87.5%.

Tipo di propellente	Condizioni di progetto del propulsore	Dimensionamento del propulsore ($p_e = 13800$ [Pa])	Portata e pressione di ingresso al motore
$X = 0.7$ $\rho = 1309.5$ [kg/m ³] $p_v = 800$ [Pa] $R = 395.3225$ [J/(kmole K)] $\nu = 9.54 \times 10^{-7}$ [m ² /s]	$F = 5$ [N] $T_c = 515.5$ [K] $p_c = 10$ [bar] $G = 50$ [kg/(m ² s)]	$D_c = 11.117$ [mm] $D_t = 2.033$ [mm] $D_e = 5.4462$ [mm]	$\dot{m} = 4.85$ [g/s] $p_{ingresso} = 11.3$ [bar]
	$F = 25$ [N] $T_c = 515.5$ [K] $p_c = 10$ [bar] $G = 50$ [kg/(m ² s)]	$D_c = 24.859$ [mm] $D_t = 4.546$ [mm] $D_e = 12.178$ [mm]	$\dot{m} = 24.27$ [g/s] $p_{ingresso} = 11.3$ [bar]
$X = 0.875$ $\rho = 1386.9$ [kg/m ³] $p_v = 750$ [Pa] $R = 378.6810$ [J/(kmole K)] $\nu = 9.16 \times 10^{-7}$ [m ² /s]	$F = 5$ [N] $T_c = 955.44$ [K] $p_c = 10$ [bar] $G = 50$ [kg/(m ² s)]	$D_c = 9.6408$ [mm] $D_t = 2.034$ [mm] $D_e = 5.4304$ [mm]	$\dot{m} = 3.65$ [g/s] $p_{ingresso} = 11.3$ [bar]
	$F = 25$ [N] $T_c = 955.44$ [K] $p_c = 10$ [bar] $G = 50$ [kg/(m ² s)]	$D_c = 21.557$ [mm] $D_t = 4.5482$ [mm] $D_e = 12.143$ [mm]	$\dot{m} = 18.25$ [g/s] $p_{ingresso} = 11.3$ [bar]

Tabella 2.1 Tabella riassuntiva caratterizzazioni dei motori

Dalla tabella è possibile farsi un'idea delle portate e delle pressioni che l'impianto di approvvigionamento del perossido d'idrogeno dovrà soddisfare.

Le portate vanno dai 3,65 g/s fino ai circa 25 g/s. Sono portate piccole e che quindi andranno ottenute e misurate con strumenti di opportuna precisione.

La pressione in ingresso al motore è superiore alle 11 atmosfere e quella necessaria per pressurizzare il serbatoio principale dipenderà dalle perdite introdotte dai vari componenti che verranno inseriti lungo la linea ma non supererà le 20 atmosfere.

L'impianto dovrà anche avere la capacità di stoccare la quantità di perossido d'idrogeno necessaria per un certo numero di spari previsti.

2.1.2 Requisiti di sicurezza

Importantissimi sono i requisiti di sicurezza necessari a garantire la salvaguardia del personale e delle apparecchiature impiegati nella sperimentazione.

Oltre alla scelta di materiali che siano compatibili con l' H_2O_2 è di massima importanza compiere scelte realizzative che annullino la possibilità di contatto tra il propellente e il personale e massimizzino la pulizia dell'impianto.

L'impianto di approvvigionamento avrà pertanto:

- un controllo in tempo reale della temperatura e della pressione del perossido d'idrogeno all'interno del serbatoio
- la possibilità di scaricare da ogni parte del circuito verso un pozzetto l' H_2O_2
- la possibilità di pulire con gas inerte in pressione tutta la linea interessata dal passaggio di perossido d'idrogeno
- la possibilità di attuare in remoto tutte le valvole necessarie a gestire sia l'alimentazione del propellente, sia la ripulitura delle linee (attraverso l'impiego di valvole elettro-pneumatiche comandate da PC ed attuate da azoto in pressione)
- sistemi di sicurezza attivi (valvola di sfiato azionabile in remoto) e passivi (valvole di sfiato e disco a rottura) atti ad evitare la generazione di sovrappressioni all'interno del circuito dovute a decomposizione incontrollata del perossido di idrogeno

L' H_2O_2 che verrà utilizzato nella sperimentazione sarà di due concentrazioni diverse: 70% e 87,5%. Il perossido d'idrogeno all'87,5% di purezza viene fornito dalla Degussa in bottiglie da 1 litro ciascuna ed ogni spedizione, per motivi di sicurezza, non può superare i 4 litri. Il perossido al 70% viene ricavato per diluizione del perossido all'87,5% con perossido al 30%.

Per ridurre i rischi connessi alla manipolazione diretta del perossido di idrogeno da parte dell'operatore durante la fase di riempimento del serbatoio, si è previsto l'utilizzo di un sistema di travaso in pressione in grado di svuotare direttamente il contenuto dalla bottiglia di H_2O_2 al serbatoio di stoccaggio. La bottiglia viene debolmente pressurizzata con azoto e tale sovrappressione permette lo svuotamento della medesima attraverso una cannula. La pressurizzazione viene azionata a distanza e ciò garantisce un livello adeguato di sicurezza per l'operatore andando ad evitare pericolose operazioni manuali di travaso.

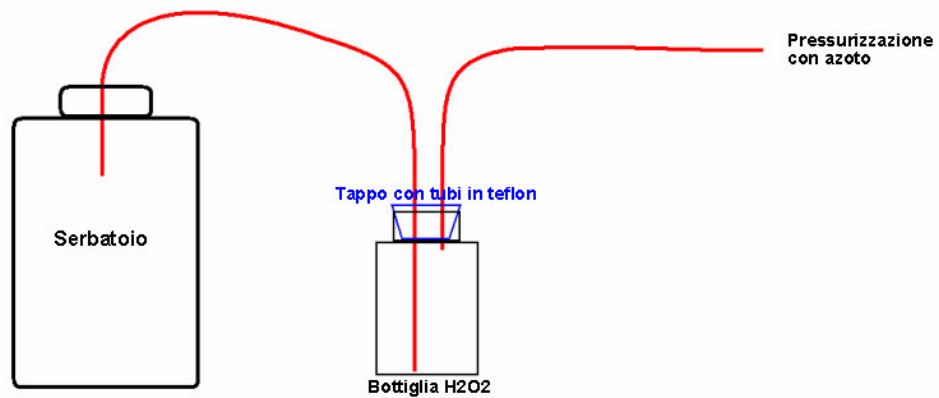


Figura 2.1 Schema sistema riempimento serbatoio

2.1.3 Requisiti di trasportabilità

Il banco di prova del motore, costituito essenzialmente dall'impianto di approvvigionamento del propellente e da una bilancia di spinta in grado di vincolare opportunamente il motore e di misurarne la spinta generata, per esigenze di funzionalità deve essere montato in una sede che ne consenta il trasporto. Tale trasporto deve avvenire evitando di smontare tutti i componenti principali. Per questo scopo è stata realizzata una struttura simile ad un container, assicurata ad un carrello trainabile da un automezzo, al cui interno è stato realizzato l'impianto.

Tale struttura impone dei limiti d'ingombro nel progetto, che deve essere strutturato in modo tale da essere completamente contenuto all'interno della struttura e configurabile in modo semplice per consentire il trasporto in sedi diverse.

In figura 2.1 vengono indicati i posizionamenti delle varie parti che costituiranno l'intero impianto di prova per i motori a perossido d'idrogeno. Nella parte posteriore saranno alloggiati gli alimentatori e gli interruttori di controllo della valvole. Le valvole potranno anche essere azionate da remoto tramite connessione al personal computer.

Nella parete frontale è ricavata un'apertura realizzata per permettere l'uscita del getto del propulsore durante il funzionamento del medesimo.

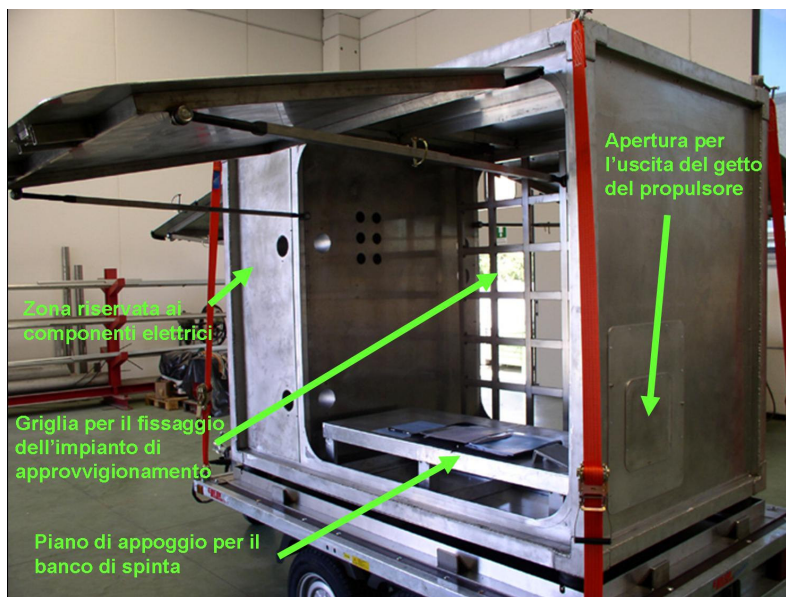


Figura 2.2 *Principali parti della struttura di alloggiamento dell'impianto*

Nel ventre della struttura si può notare una grande griglia. Questa divide in due parti il volume interno della struttura ed è scorrevole per rendere agevole il montaggio e per consentire la massima configurabilità ed ottimizzazione dello spazio interno. La sua funzione è quella di fornire una superficie di riferimento e di sostegno per l'assemblaggio dei principali componenti che andranno a costituire l'impianto.

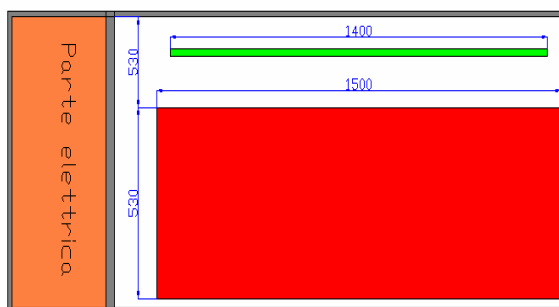


Figura 2.3 *Spazi interni e griglia del cubo*

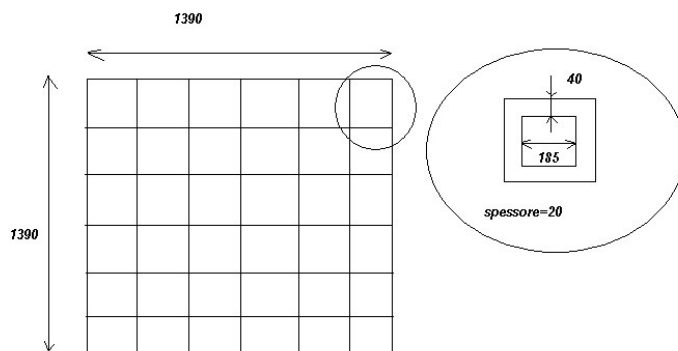


Figura 2.4 *Ingombri e dimensioni della griglia*

Nelle figure 2.2 e 2.3 è possibile vedere in dettaglio i volumi utili interni al cubo e la griglia con le sue dimensioni massime utili per il montaggio delle parti dell'impianto.

La griglia può scorrere lungo la larghezza del cubo di 530 mm dando una certa libertà di configurazione. E' possibile notare che l'impianto dovrà avere un ingombro massimo in altezza e laterale di 1390 mm ed una profondità limite di circa 500 mm.

La struttura è inoltre dotata di aperture che consentono il passaggio dei cavi e delle tubazioni che connettono il banco di prova alla rete elettrica, al PC ed al sistema di pressurizzazione esterni alla struttura. In questo modo i grandi portelloni laterali possono essere chiusi senza interferire con le suddette connessioni.

Allo scopo di alleviare le vibrazioni durante il trasporto sono stati strutturati dei sostegni a cuscinetto ad aria che sorreggono la struttura sulla superficie metallica del carrello. Anche la griglia è sostenuta con due cuscinetti ad aria opportunamente montati per permetterne lo scorrimento in delle guide apposite.

2.2 Scelte progettuali

2.2.1 Regolazione della portata

Le portate di perossido d'idrogeno necessarie all'alimentazione dei due motori sono pari a 3.65 [g/s] e 18.25 [g/s]. Per assicurare tali portate è stato scelto l'utilizzo di un dispositivo passivo di regolazione della portata rappresentato da un venturi cavitante. In condizioni stazionarie, nell'ipotesi di conservazione della pressione totale, in corrispondenza della gola si ha la massima velocità del fluido e di conseguenza la minima pressione statica. Se la pressione nella sezione di gola scende sotto il valore della pressione di vapore del liquido allora si ha cavitazione e quindi passaggio alla fase gassosa. La regione cavitante che si viene a formare risulta dipendente dalla pressione a monte del venturi e pertanto la portata che si viene ad instaurare risulta controllata direttamente dalla pressione nel serbatoio a monte del venturi.

Questo componente permette di svincolare, per opportuni intervalli di funzionamento, le condizioni del fluido a monte del venturi da quelle a valle del medesimo. Questo fa sì che basti determinare e regolare la pressione in ingresso al venturi per avere una portata ben definita di perossido d'idrogeno in camera di combustione. Ad ogni pressione corrisponde una portata nota e questo è mostrato nella figura 2.4. Risulta quindi molto comodo l'utilizzo di questo dispositivo in quanto è sufficiente agire su un singolo parametro conosciuto per ottenere le portate desiderate.

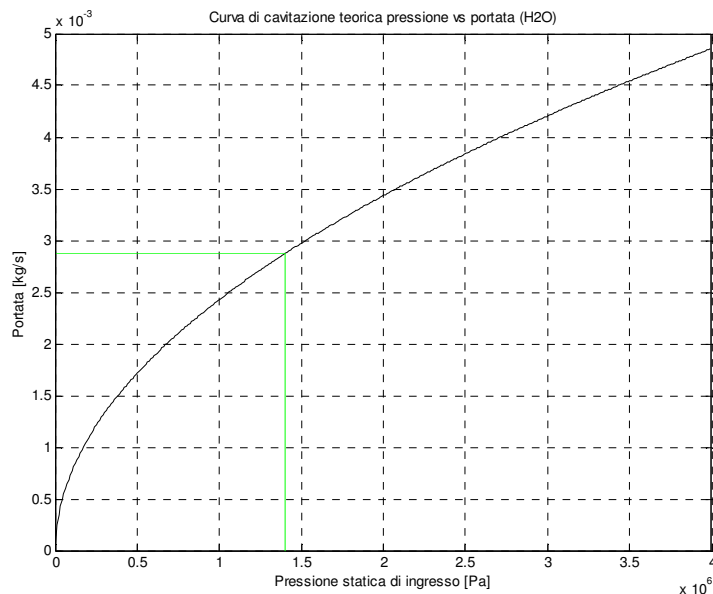


Figura 2.5 Calibrazione venturi con acqua

Il disaccoppiamento che si ottiene con l'utilizzo del venturi cavitante è utile anche per rendere la portata di fluido indipendente dalle fluttuazioni di pressione che sicuramente avverranno nella camera di combustione del motore. Tutto questo però ha un costo in perdite di carico. L'attraversamento del venturi causa una notevole perdita di pressione dato che per garantire la condizione di cavitazione la pressione in uscita dal venturi non può raggiungere valori superiori al 60-70% della pressione in ingresso.

I venturi cavitanti hanno un costo notevole, visto l'altissimo livello di lavorazione che richiedono. Per sperimentare i due motori sono stati costruiti due venturi di diametri di gola differenti. Per il motore di 5 N il diametro di gola previsto per il venturi è di 263 μm mentre per il motore da 25 N il diametro di gola è di 588 μm .

Entrambi sono stati ottimizzati per l'utilizzo di perossido di idrogeno a concentrazione in peso dell'87.5%. Per questo tipo di propellente la pressione in uscita risulta essere circa il 70% della pressione in ingresso. Utilizzando questi venturi con H_2O_2 al 70% le perdite sono molto maggiori. Infatti la pressione in uscita è pari a circa al 40% della pressione in ingresso.

2.2.2 Capacità e pressione del serbatoio

Riguardo al serbatoio è stato scelto l'utilizzo di un unico serbatoio pressurizzato rivestito in teflon. Il teflon è un materiale altamente compatibile col perossido, di conseguenza il serbatoio risulta in questo modo adatto a stoccare anche per tempi prolungati l'acqua ossigenata.

Il serbatoio verrà riempito ogni qualvolta ve ne sia bisogno con la procedura descritta nel paragrafo 2.1.2. La capienza utile è stata stimata in circa 3 litri di H_2O_2 . Tale volume dovrebbe consentire, con perossido d'idrogeno in concentrazione del 70%, una durata continuativa degli spari di 160 secondi con il motore da 25 N.

Infatti, risultando:

$\rho_{70} = 1309.5 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	densità H ₂ O ₂ al 70%
$Pm_{70} = 24.27 \text{ [g/s]}$	portata in massa di propellente
$V_s = 3 \text{ [L]}$	volume del serbatoio

Si ottiene una portata volumetrica di propellente $Pv_{70} = 1.85 \cdot 10^{-2} \text{ [L/s]}$ e pertanto un tempo di sparo continuativo pari a:

$$T = V_{s70} / Pv_{70} = 162 \text{ [s]}$$

Utilizzando invece il motore da 5 N e il perossido all'87.5% si ha:

$\rho_{90} = 1386.9 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	densità H ₂ O ₂ al 90%
$Pm_{90} = 3.65 \text{ [g/s]}$	portata in massa di propellente
$V_s = 3 \text{ [L]}$	volume del serbatoio

da cui si ottiene una portata volumetrica $Pv_{90} = 2.63 \cdot 10^{-3} \text{ [L/s]}$ ed un tempo di sparo continuativo pari a:

$$T = V_s / Pv_{90} = 1140 \text{ [s]}$$

Dai risultati è dimostrato che i 3 litri di volume scelti sono più che sufficienti per le prove a regime e per le prove finalizzate alla misurazione dei transitori di accensione ed il funzionamento impulsivo degli endoreattori.

Viste le caratteristiche del venturi cavitante sarà la pressione in ingresso ad esso a stabilire la portata in ingresso al motore. Visto che le perdite di carico dal serbatoio al venturi sono trascurabili è possibile stabilire che sarà la pressione interna del serbatoio quella determinante per il sistema e, di conseguenza, i parametri di funzionamento del motore saranno in funzione di essa.

Il range di pressione applicabile nel serbatoio viene limitato dalle caratteristiche stesse del venturi cavitante. Il margine minimo è dato dalla pressione minima sotto la quale nel venturi si ha cavitazione incipiente (inception). In pratica nella gola non si instaura la bolla di cavitazione e quindi il venturi non può svolgere la sua funzione di regolare la portata ad un valore fissato. Il limite superiore invece è quello di break-down corrispondente ad un valore della pressione per cui la bolla occupa tutto il divergente.

In figura 2.5 sono riportati gli andamenti della pressione in camera di combustione e della portata di H₂O₂ in funzione della pressione interna del serbatoio. E' stato messo in risalto, rappresentandolo con una linea rossa, il limite di pressione interna al serbatoio al di sotto della quale non si innesca la cavitazione. Il grafico si riferisce al motore da 5 N di spinta alimentato con perossido d'idrogeno in concentrazione dell'87,5% e con il venturi cavitante da 263 µm di diametro di gola.

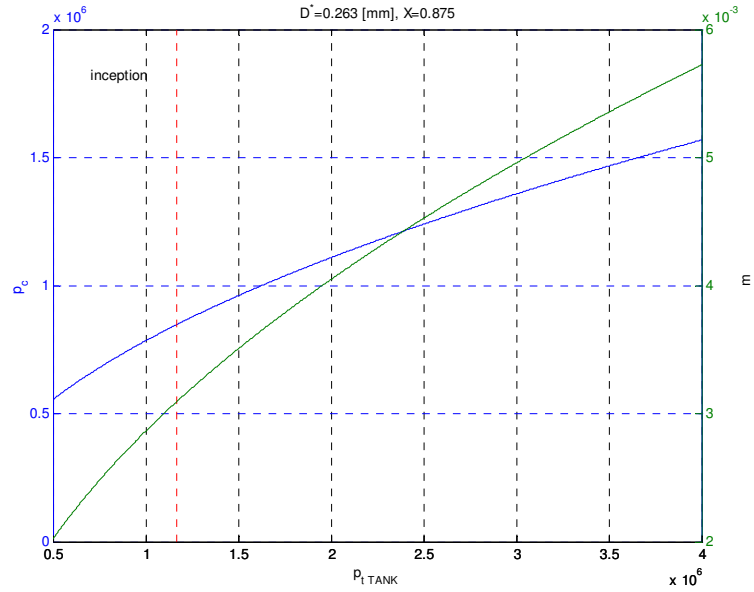


Figura 2.6 Grafico pressione in camera di combustione e portata in funzione della pressione interna del serbatoio (motore da 5 N, concentrazione H_2O_2 87,5%, venturi diametro 263 μm)

In figura 2.6 viene riportato anche il grafico analogo per il motore da 25 N di spinta alimentato con H_2O_2 in concentrazione dell'87,5% e venturi cavitante da 588 μm di diametro di gola.

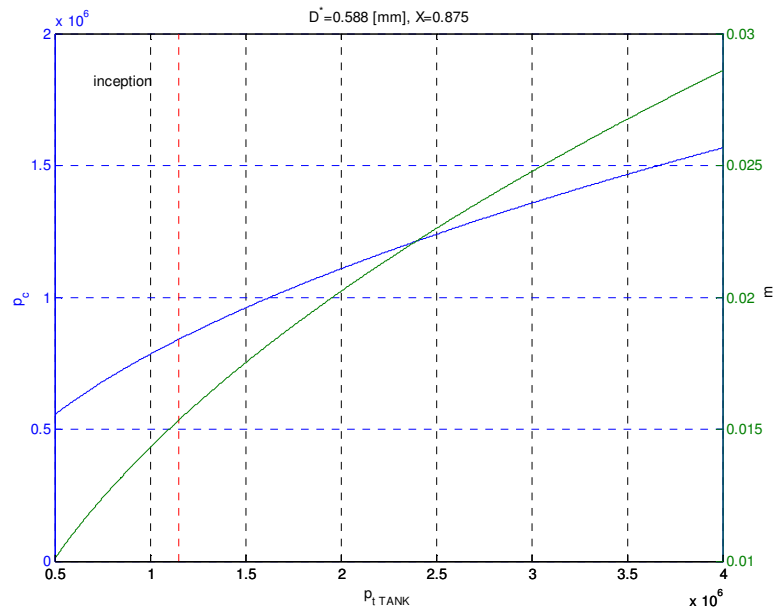


Figura 2.7 Grafico pressione in camera di combustione e portata in funzione della pressione interna del serbatoio (motore 25 N, concentrazione H_2O_2 87,5%, venturi diametro 588 μm)

2.3 Progettazione concettuale

Nella progettazione concettuale si è realizzato uno schema dell'impianto di approvvigionamento nel quale si evidenziano i componenti necessari e le linee principali.

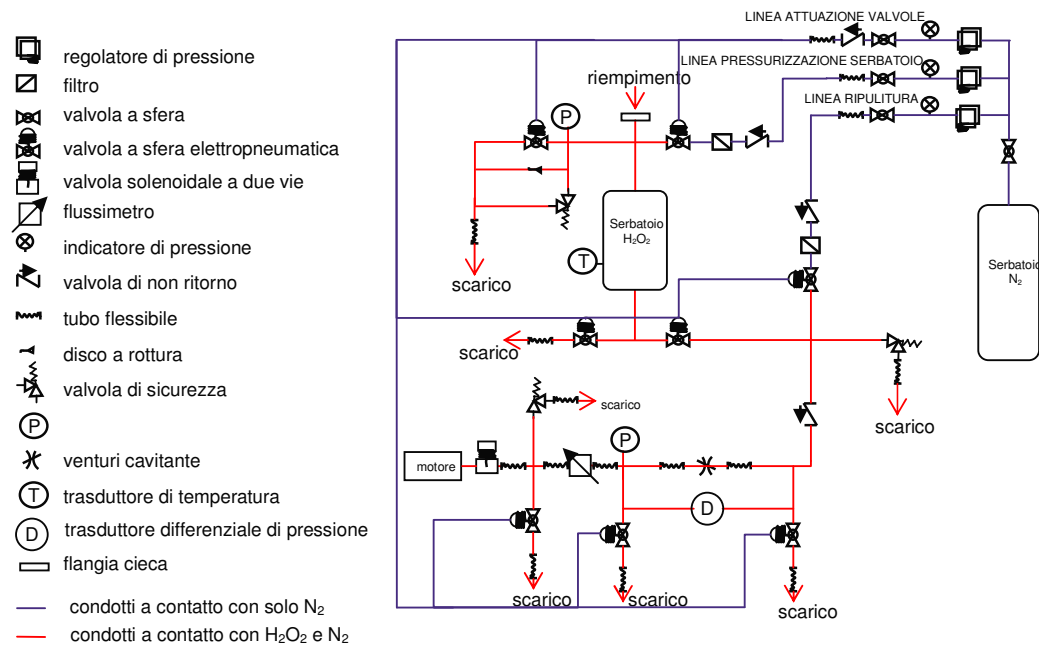


Figura 2.8 Schema dell'impianto di approvvigionamento del propellente

In figura 2.8 è riportato lo schema dell'impianto di approvvigionamento adottato. Esso è composto da due linee: la linea bagnata dall'H₂O₂ (evidenziata in rosso) e la linea per l'azoto in pressione (evidenziata in blu).

Fisicamente l'impianto di approvvigionamento risulta diviso in due zone collegate con tubi flessibili. La zona che entra a contatto con il perossido di idrogeno e la parte della linea pneumatica preposta all'attuazione delle valvole trovano sede all'interno della struttura menzionata nel capitolo 2.1.3 mentre la zona che comprende la bombola di azoto e il gruppo per la regolazione della pressione per le varie linee è situata esternamente alla struttura.

Nei paragrafi seguenti vengono analizzate più in dettaglio le varie parti del sistema.

2.3.1 La linea dell'H₂O₂

Il propellente viene immesso nel serbatoio attraverso l'apertura posta alla sua sommità. Questa apertura, una volta riempito il serbatoio, viene chiusa da una flangia cieca. Sempre nella parte superiore del serbatoio sono presenti un ingresso per il gas pressurizzante (a destra) ed una via di fuga che porta ai sistemi di sicurezza del serbatoio (le tre linee in alto a sinistra). L'entrata del gas pressurizzante è regolata da una valvola a sfera attuata elettropneumaticamente. I sistemi di sicurezza del serbatoio sono una valvola a sfera elettropneumatica, un disco a rottura ed una valvola di sfiato. Qualora la pressione nel

serbatoio, misurata attraverso un trasduttore di pressione, raggiungesse valori critici per il serbatoio la prima operazione da effettuare è l'apertura della valvola elettropneumatica. Nel caso in cui l'apertura della valvola non riuscisse si avrebbe l'apertura, ad una pressione ben definita, della valvola di sfiato.

Infine, se desse problemi anche quest'ultima si avrebbe, ad una pressione più elevata della precedente, la rottura del disco a rottura e la conseguente apertura della via di fuga al gas.

Oltre alla pressione, nel serbatoio viene monitorata, con una termocoppia, la temperatura del propellente. Questo permette verificare eventuali decomposizioni di perossido di idrogeno nel serbatoio.

Il serbatoio, nella parte inferiore, presenta due uscite entrambe regolate attraverso delle valvole a sfera attuate elettropneumaticamente. La valvola di sinistra porta allo scarico e viene utilizzata nel caso in cui si voglia effettuare uno svuotamento rapido del serbatoio. La valvola di destra porta alla linea di sparo. Sulla linea di sparo sono presenti in ordine i seguenti componenti: una valvola di non ritorno, un venturi cavitante (si veda capitolo 2.2.1), un flussimetro (che misura la portata di propellente) ed una valvola solenoidale adibita al controllo dell'ingresso del propellente al motore. La valvola di non ritorno impedisce al perossido di idrogeno di rientrare nel serbatoio a seguito di malfunzionamenti dell'impianto. Per monitorare il funzionamento del venturi cavitante sono stati inseriti un trasduttore di pressione differenziale ed un trasduttore di pressione assoluta. Il primo misura il salto di pressione tra l'ingresso e l'uscita del venturi, mentre il trasduttore assoluto misura la pressione a valle del venturi. In corrispondenza del trasduttore differenziale sono state inserite due linee per il drenaggio del propellente regolate da delle valvole a sfera elettropneumatiche.

Nell'impianto per l' H_2O_2 sono state inserite due valvole di sfiato, una prima della valvola di non ritorno ed una prima della valvola solenoidale. La loro funzione è quella di permettere lo sfiato dei prodotti della decomposizione di perossido di idrogeno eventualmente rimasto intrappolato in alcuni tratti dell'impianto di approvvigionamento.

Infine, prima della valvola solenoidale è stata inserita una diramazione per una linea di drenaggio regolata, anche in questo caso, da una valvola a sfera attuata elettropneumaticamente. Questa linea può essere utilizzata per svuotare il tratto dal serbatoio fino alla valvola di sparo.

2.3.2 La linea dell'azoto

L'impianto dell'azoto è costituito da tre linee principali ognuna caratterizzata da una propria pressione.

- *La linea di pressurizzazione*
- *La linea di attuazione delle valvole*
- *La linea di ripulitura*

La linea di pressurizzazione è adibita alla messa in pressione del serbatoio e della linea di alimentazione del motore. Essa è composta da un regolatore di pressione, da un manometro, da una valvola a sfera manuale e da una valvola di non ritorno. La valvola a sfera determina l'utilizzo o meno della linea, la valvola di non ritorno è un dispositivo di sicurezza per proteggere il sistema da eventuali malfunzionamenti ed il manometro permette di visualizzare la pressione sulla linea regolata attraverso il regolatore di pressione.

Prima dell'ingresso dell'azoto nel serbatoio c'è un filtro che trattiene eventuali particelle che possono contaminare il perossido di idrogeno. L'ingresso del gas nel serbatoio è gestito da una valvola a sfera ad attuazione elettropneumatica.

Le pressioni di questa linea saranno comprese tra i 15 bar ed i 20 bar.

La linea di attuazione delle valvole permette il corretto funzionamento degli attuatori elettropneumatici alimentandoli di gas in pressione. La pressione tipica per l'attuazione si aggira attorno alle 3-5 atm. La linea di attuazione ha gli stessi componenti della linea di pressurizzazione tranne che per il filtro che in questo caso è assente.

La linea di ripulitura ha gli stessi componenti della linea di pressurizzazione e funziona in modo perfettamente analogo. Questa linea permette di ripulire il tratto a valle del serbatoio.

Le pressioni per la ripulitura sono comprese tra i 7 bar ed i 10 bar.