

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

## ***Relazione per la prova finale***

# ***Propellenti per applicazioni aerospaziali***

Tutor universitario: *Professoressa Roberta Bertani*

Laureando: *Bortoli Marco*

Padova, 22/03/2024

- Nel seguente documento verrà trattato l'argomento riguardante le possibili scelte di propellenti per razzo. Verranno distinte e descritte le varie tipologie; verranno riportate le sottocategorie per ogni tipologia, con alcuni esempi, distinguendone vantaggi e svantaggi in ambito di utilizzo (ad esempio affidabilità, impulso specifico, possibilità di modulazione spinta) e le conseguenti implicazioni a livello strutturale del razzo, quindi la struttura stessa dello stadio (serbatoi in pressione, regolatori, pompe, ecc.). Sarà presentato un breve specchio sulle leggi principali che caratterizzano i principi di funzionamento del razzo (spinta, conservazione della quantità di moto, ecc.). Si terminerà individuando e distinguendo l'adeguatezza delle varie categorie di propellenti alle altrettanto varie applicazioni.

## INDICE

- ❖ Definizione Propellente e classificazione tipologie (pag. 3).
- ❖ Leggi funzionali della propulsione del razzo (pag. 4).
- ❖ **Propellenti Solidi**
  - Descrizione, Ambito di utilizzo (pag. 5).
  - Vantaggi, Svantaggi (pag. 6).
  - Introduzione alla struttura dei motori a razzo alimentati da propellenti solidi (pag. 7).
- ❖ **Propellenti Liquidi**
  - Descrizione, Ambito di utilizzo (pag. 8).
  - Vantaggi, Svantaggi (pag. 9).
  - Introduzione alla struttura dei motori a razzo alimentati da propellenti liquidi (pag. 10).
- ❖ **Propellenti Ibridi**
  - Descrizione, Ambito di utilizzo (pag. 11).
  - Vantaggi, Svantaggi (pag. 12).
  - Introduzione alla struttura dei motori a razzo alimentati da propellenti ibridi (pag. 13).
- ❖ Conclusioni (pag. 14).
- ❖ Bibliografia (pag. 15).

## DEFINIZIONE

- I propellenti chimici sono masse atte a reagire esotermicamente (sviluppando calore) e in modo graduale. Il risultato di questa reazione è un grande volume di prodotti di reazione, principalmente di natura gassosa, con temperature elevate. Suddetto processo risulta indipendente dall'ambiente esterno. I propellenti sono costituiti da due componenti, indispensabili per la realizzazione della combustione: l'agente **combustibile** e quello **comburente**.

## CLASSIFICAZIONE

Esistono varie classificazioni possibili, le principali si sviluppano:

- A seconda dell'associazione tra questi due ingredienti e si distinguono in:
  - Sistemi **Monopropellenti**: associati in singole molecole di composti chimici definiti (Possono essere sia solidi sia liquidi).
  - Sistemi **Bipropellenti**: tenuti separati fino al raggiungimento della camera di combustione dove vengono miscelati (liquidi).
  - Sistemi **Pluripropellenti**: più di 2 ingredienti liquidi (es. un agente ossidante associato ad una miscela di combustibile).
- A seconda della stato della materia degli ingredienti distinguendosi in:
  - Propellenti **solidi**: composti chimici solidi. Principalmente monopropellenti.
  - Propellenti **liquidi**: composti chimici liquidi. Possono essere monopropellenti, bipropellenti, pluripropellenti.
  - Propellenti **ibridi**: composti chimici solidi e liquidi. Solitamente il combustibile è solido e il comburente è liquido.

## INTRODUZIONE

Il motore per applicazioni aerospaziali è l'endoreattore. Questo contiene al suo interno il comburente necessario per la realizzazione della reazione chimica e ciò permette il suo funzionamento nel vuoto spaziale. La struttura impiantistica varia in funzione del propellente elaborato il quale esiste in varie tipologie e composti.

## LEGGI FUNZIONALI

Il motore, indipendentemente dalla tipologia di propellenti impiegati, è governato da due leggi principali:

- **Principio di continuità:** la portata di massa elaborata dal sistema c.c./ugello si conserva tra ingresso e uscita.
- **Principio di conservazione della quantità di moto:** la spinta generata è proporzionale alla velocità di effusione dei fumi all'ugello.

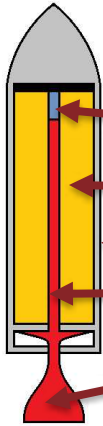


## PARAMETRI CARATTERISTICI

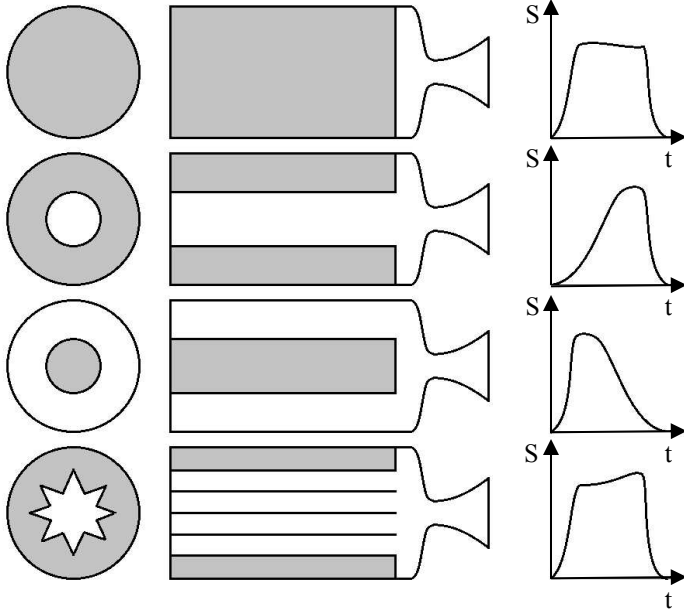
- **Spinta:**  $\gamma \cdot m \cdot v_e + A_e \cdot (P_e - P_s)$   $\Rightarrow$   $\gamma$  identifica un parametro descritto dall'angolo effettivo di efflusso,  $m$  individua la massa elaborata dal sistema, con  $A_e$  viene indicata l'area di uscita dell'ugello, con  $P_e - P_s$  si indica la differenza di pressioni tra esterno ed interno e con  $v_e$  la velocità di uscita dall'ugello.
- **Velocità caratteristica:**  $\sigma \cdot \sqrt{\frac{T_{cc}}{M_{cc}}}$   $\Rightarrow$   $\sigma$  rappresenta un parametro dipendente dal rapporto  $C_p/C_v$  del gas,  $T_{cc}$  rappresenta la temperatura raggiunta nella camera di combustione e  $M_{cc}$  la massa molare del gas. Individua la velocità dei gas all'interno della camera di combustione e le conseguenti prestazioni.
- **Impulso specifico:**  $\frac{S}{m \cdot g}$   $\Rightarrow$   $S$  indica la spinta,  $m$  la massa di propellente e  $g$  l'accelerazione di gravità. Identifica l'efficienza propulsiva.

- Sono composti da elemento combustibile solido, elemento comburente solido e additivi. La forma viene sviluppata all'interno di un cilindro dove il composto viene pressato in grani di diverse forme e dimensioni. Al centro vi è un'apertura la cui forma definisce l'andamento della spinta impartita nel tempo. Trovano impiego nei booster e nei primi stadi di un razzo. Si possono distinguere principalmente in:
  - **Propellenti Polvere Nera:**  
Composti da carbone vegetale (combustibile), nitrato di potassio (comburente), zolfo (additivo). Non trovano impiego in ambito spaziale per l'alta sensibilità alla fratturazione e le scarse prestazioni (impulso non superiore a 40 s).
  - **Propellenti Zinco-Zolfo:**  
Composti da zinco e zolfo in polvere. Non trovano impiego in ambito spaziale per le scarse prestazioni.
  - **Propellenti dolci:**  
Composti da un comburente (tipicamente nitrato di potassio) ed un combustibile "zuccheroso" (destrosio, sorbitolo o saccarosio). Impiegati principalmente su razzi amatoriali (impulso medio-basso, circa 130 s).
  - **Propellenti doppia base:**  
Composti da due componenti monopropellenti, generalmente uno ad energia superiore (instabile) e l'altro ad energia inferiore (stabilizzante). Tipicamente nitrocellulosa disciolta in gel di nitroglicerina, solidificata tramite additivi. Trovano impiego in applicazioni dove è richiesto poco fumo e prestazioni medio-alte (impulso circa 235 s). Queste possono essere aumentate tramite l'aggiunta di combustibili metalli (alluminio) fino a 250 s.
  - **Propellenti composti:**  
Corrispondo alla miscelazione di un ossidante ed un metallo in polvere legati da un composto che agisce come combustibile. Tipicamente nitrato d'ammonio, forniscono prestazioni medie, circa 210 s. Un altro composto è il perclorato di ammonio, il quale fornisce prestazioni elevate, circa 265 s. Con l'aggiunta di esplosivi ad alta energia si raggiungono impulsi di circa 275 s ma sono poco utilizzati per il pericolo associato.

VANTAGGI	SVANTAGGI
Semplicità costruttiva	Impossibilità di modulazione della spinta
Stabilità nel tempo, immagazzinamento prolungato	Impossibilità di spegnimento una volta avviati
Combustione in funzione della geometria dei grani	Impulsi specifici modesti
Costi contenuti	Inquinamento ambientale per emissione di CO <sub>2</sub> e altri composti di carbonio.
Affidabilità di funzionamento	Fragilità propellente che se crepato comporta la creazione di ulteriore superficie di combustione e conseguente aumento della pressione non di progetto
Transitorio di accensione più rapido rispetto a razzi a propellente liquido	Impossibilità di riutilizzo del razzo



- La struttura è relativamente semplice. Troviamo 5 componenti essenziali:
  - **Sistema di accensione:** ha il compito di avviare la reazione.
  - **Grano propellente:** massa solida che tramite il processo di combustione produce i gas di scarico.
  - **Involucro:** isola le componentistiche interne dall'ambiente esterno e deve sopportare le pressioni interne.
  - **Canale centrale:** definisce in funzione della sua forma l'andamento temporale della spinta.
  - **Ugello:** dimensionato in modo da elaborare un gas di una certa pressione e produrre una spinta conseguente all'espulsione di questo ad alta velocità, tramite principio di azione-reazione.



## CANALE CENTRALE

L'andamento nel tempo della spinta generata è in funzione della geometria del propellente contenuto all'interno dell'involucro. In particolare, in funzione della forma del canale centrale, si definisce la superficie di carburante esposto alla combustione; potrà essere maggiore o minore e cambierà durante tutta la reazione così come la quantità stessa del propellente. In generale si avrà un andamento temporale sintetizzato nei diagrammi di fianco. E' evidente che i vari profili di spinta determinano adeguatezze a certe tipologie di missioni rispetto altre, di fatto questo rappresenta uno dei parametri di progettazione. A seconda della superficie del canale centrale e della pressione nella camera di combustione, viene determinato il tasso di combustione dei granuli di combustibile. Le caratteristiche di questi in generale definiscono la durata della combustione.

- Sono sostanze chimiche allo stato liquido utilizzate come propellente. Alcune si configurano in suddetto stato a temperatura ambiente (es. Kerosene), altre mantengono lo stato liquido solo a temperature criogeniche (propellenti criogenici). A seconda del numero dei componenti del composto si possono distinguere in:

- **Monopropellenti:**

Combustibili che non hanno bisogno di ossidanti. Vengono fatti passare attraverso un catalizzatore che ne provoca la decomposizione con conseguente generazione di gas caldi. Vengono principalmente impiegati nei motori di controllo d'assetto dei satelliti, le principali sostanze impiegate sono perossido d'idrogeno, idrazina e ossido di diazoto. L'impulso specifico è tra i 250 s e i 350 s.

- **Propellenti a gas freddi**

Sono contenuti in serbatoi a temperatura ambiente ma con pressioni elevate in modo da mantenere lo stato liquido; hanno basse prestazioni ma semplificano relativamente l'impianto e sono in generale molto affidabili. Le sostanze più diffuse sono Elio, Argon e Nitrogeno Gassoso. Solitamente vengono impiegati per il controllo d'assetto.

- **Bi-propellenti criogenici:**

Combustibili che bruciano in presenza di ossidanti. Le sostanze vengono tenute inizialmente in serbatoi separati, vengono successivamente mescolati nella camera di combustione. Mantengono lo stato liquido solo a temperature criogeniche e per tanto comportano una complicazione nella struttura e progettazione del serbatoio che dovrà garantire suddette temperature. I principali composti impiegati sono Kerosene/Ossigeno liquido, Idrogeno liquido/Ossigeno liquido e Idrazina/tetrossido di Azoto. Raggiungono impulsi specifici fino a 500 s.

- **Bi-propellenti stoccabili:**

Sono analoghi ai precedenti con la differenza che mantengono il loro stato liquido a temperatura ambiente. Questo significa una relativa semplificazione nella progettazione e costruzione dei serbatoi. Raggiungono impulsi specifici fino a 450 s.



VANTAGGI	SVANTAGGI
Impulsi specifici medio-alti	Complicatazza impiantistica
Possibilità di modulazione spinta	Costi più alti
Possibilità di accensione e spegnimento, anche ripetuti	Pericolosità associata alla presenza di serbatoi in pressione e da sostanze corrosive
Possibilità di test pre-lancio per mitigazione rischi	Fenomeni di sloshing: moto del fluido all'interno del serbatoio durante il volo
Possibilità di riutilizzo del razzo	Necessità di preparativi pre-lancio prolungati
Stabilità chimica del propellente che non si decompone durante la missione o durante l'immagazzinamento prolungato	Traslazione del centro di massa causato dal progressivo svuotamento dei serbatoi

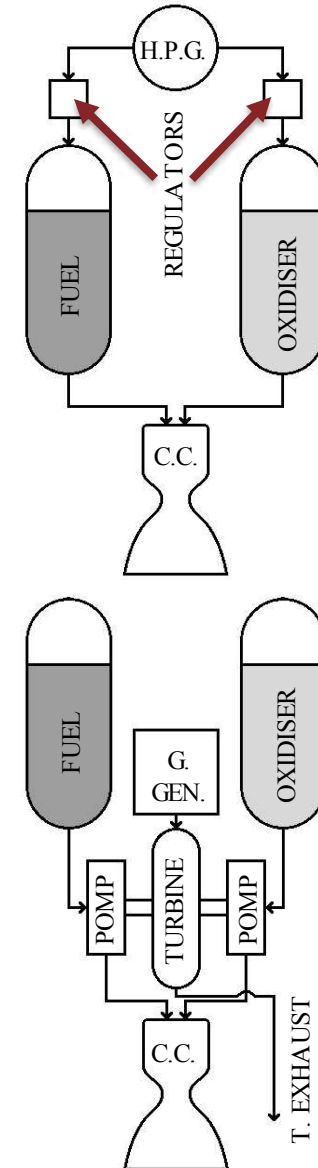
- Esistono due configurazioni possibili:

- **Sistema a gas pressurizzati**

I serbatoi di combustibile e comburente sono pressurizzati a terra; man mano che questi si svuotano viene introdotto un gas pressurizzato (prelevato da un serbatoio in pressione) nei serbatoi tramite dei regolatori di pressione. Il combustibile e ossidante vengono miscelati nella camera di combustione e poi fatti fluire attraverso un ugello convergente divergente per convertire il carico di pressione in carico cinetico e generare una spinta per azione-reazione.

- **Sistema a pompe**

I serbatoi non sono pressurizzati a terra. La portata necessaria di combustibile e comburente viene prelevata da delle turbopompe le quali sono calettate su uno stesso albero mosso da una turbina. Suddetto componente conferisce potenza all'albero convertendo l'energia meccanica, prelevata da un gas caldo, in lavoro; questo gas viene a sua volta prodotto da un generatore di gas caldi. Il resto del processo è analogo all'impianto precedente.

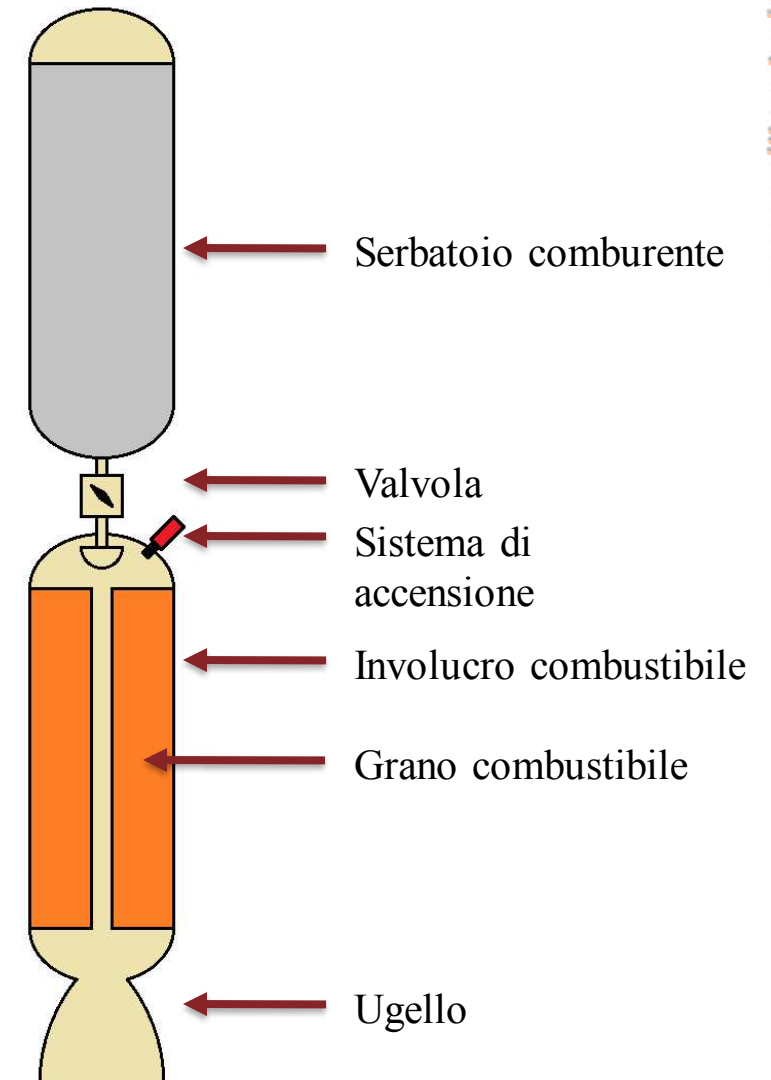


- Sono bi-propellenti in cui uno dei componenti è allo stato liquido e il corrispettivo allo stato solido. Le configurazioni si dividono in:
  - **Configurazione tipica:** combustibile solido, comburente liquido
  - **Configurazione inversa:** combustibile liquido, comburente solido.
  - **Configurazione ibrida mista:** combustibile solido con piccola quantità di comburente solido, comburente liquido.
- Le combinazioni più comuni sono:
  - **Ossigeno liquido** come comburente liquido, **HTPB** (Polibutadiene con radicali ossidrilici terminali) come combustibile solido. La combustione produce gas di scarico non tossici e con poco fumo. Risulta la combinazione favorita per le applicazioni future dei booster in quanto fornisce prestazioni comparabili a quelle ottenute con bi-propellenti come LOX/Kerosene.
  - **Ossigeno** o **ossido d'azoto** (liquidi o gassosi) come comburenti, **Polibutadiene** o **Paraffina** come combustibile. Forniscono prestazioni elevate.
  - **Perossido di idrogeno** (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) con **HAN** (nitrato di idrossilammonio). Hanno buone proprietà termochimiche e generano fumi di scarico non tossici. L'efficienza di combustione è comparabile con quella ottenuta usando LOX, ma sono vantaggiosi in termini di stoccaggio e inquinamento ambientale.
- I propellenti ibridi possono beneficiare dell'eventuale aggiunta di **polvere di alluminio** al combustibile. Nonostante questo comporti la formazione di fumi nei gas di scarico, la sua aggiunta aumenta la temperatura di combustione e riduce il rapporto di miscela stechiometrico (a parità di comburente serve meno combustibile), in generale però potrebbe ridurre l'impulso specifico ottenuto.

VANTAGGI	SVANTAGGI
Impulsi specifici più alti dei propellenti solidi	Rapporto di miscela variante, spinta instabile
Possibilità di aggiunta additivi metallici nei grani	Basso tasso di regressione del combustibile solido
Semplicità Impiantistica	Possibilità di rottura del combustibile solido con conseguente aumento della superficie esposta alla combustione
Combustibili a densità maggiore: minor ingombro	Ritorno di fiamma: gli ossidanti che si decompongono possono causare il ritorno di fiamma provocando l'esplosione del serbatoio
Versatilità: possono essere spenti, riavviati e modulati	Instabilità a starnuto ("chugging") della combustione, avviene a basse frequenze, causata dall'interazione fra le oscillazioni di pressione.
Bassa tossicità dei gas di scarico	Traslazione del centro di massa causato dal progressivo svuotamento dei serbatoi e sloshing.

- Il razzo a propellente ibrido è composto da un endoreattore, il quale brucia il propellente composta da un componente solido e uno liquido. Esistono molteplici configurazioni possibili, in figura è rappresentata la più semplice e diretta, con una configurazione di propellente tipica (combustibile solido, comburente liquido). Notiamo la presenza dei seguenti elementi:

- **Serbatoio sostanza liquida:** in questo caso contiene il comburente liquido.
- **Valvola:** isola completamente il combustibile solido dal comburente liquido.
- **Involucro sostanza solida:** funge da camera di combustione dove avviene la reazione con conseguente produzione di gas ad alte temperature.
- **Grano combustibile:** il combustibile solido necessario per la reazione.
- **Ugello:** Componente statorico in uscita che converte il contenuto in pressione dei gas generati in contenuto cinetico al fine di espellere il gas prodotto a velocità maggiori e generare quindi una spinta maggiore secondo il principio di azione-reazione.



- Arrivando ad una conclusione, è evidente che ogni categoria di propellente ha i suoi vantaggi e svantaggi attraverso i quali è possibile preferire una tipologia rispetto ad altre. Se però si considera che i profili di funzionamento richiesti dalle varie missioni risultano molto variabili, in generale si comprende che non esiste una tipologia di propellente adatta per tutte le applicazioni, di conseguenza risulta necessario analizzare la tipologia di missione e i parametri associati (durata, orbita, payload ecc.). A partire da queste informazioni e considerato quanto riportato nelle precedenti diapositive è possibile individuare la tipologia di propellente che porta ad avere più vantaggi (o meno svantaggi) in relazione al profilo di missione da svolgere.
- Una possibile considerazione è la seguente:
  - Si impiegano sistemi a **propellente solidi** per applicazioni che richiedono alta affidabilità, con ridotti costi, bassi ingombri del combustibile per permettere il trasporto di grandi payload (ad esempio); tutto ciò considerando le complicazioni associate: impossibilità di modulazione della spinta o spegnimento del motore, impossibilità di riutilizzo del razzo, ecc.
  - Si impiegano sistemi a **propellenti liquidi** per applicazioni che richiedono alti impulsi specifici, possibilità di modulazione della spinta, eventuali spegnimenti e riavvii del razzo nel corso della missione, sacrificando la semplicità impiantistica ed accettando i costi derivanti che sono più alti dei sistemi con propellente solido.
  - Si impiegano sistemi a **propellenti ibridi** per applicazioni che richiedono contemporaneamente efficienza ed affidabilità con ingombri relativamente minori rispetto ai sistemi con propellente liquido. La versatilità dell'impianto e la relativa semplicità rendono suddetta categoria una sorta di intermediaria tra propellenti solidi e liquidi. Si configura come la tipologia di propellente favorita per le future missioni di esplorazione.

- *Appunti di Turbomacchine, Impianti e Sistemi Aerospaziali*
- *Articolo: "Come funzionano i propellenti per razzi: la scienza dietro la potenza" di Tommaso Sibia*
- *Libro: "Rocket Propulsion Elements" di George Paul Sutton*
- *Enciclopedia Treccani: definizione e classificazione. - I propellenti chimici*
- *Tesi: "Confronto tra i vari sistemi di propulsione chimica adottati in ambito spaziale" di Lazzarini Niccolò*